www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

JAARGANG 24, 1962, no. 11/12 blz. 337-388 Verschenen 21 mei 1963

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELEND TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN
SAMENHANGENDE MET DE PRODUKTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

Dit nummer is geheel gewijd aan het werk van het Instituut voor Perceptie Onderzoek te Eindhoven. Het werk van deze onderzoekinstelling beweegt zich op grensgebieden tussen diverse disciplines, het maakt gebruik van methodes en apparaturen die ons beurtelings lijken te verplaatsen in een elektronisch laboratorium en in de spreekkamer van arts of psycholoog, en het heeft tot onderwerp problemen die in haast elke uithoek van de Philipsfabrieken actueel zijn. In het inleidende artikel van prof. dr. Schouten, de leider van het instituut, komen deze en andere aspecten tot uitdrukking. Hierna volgt een vijftal artikelen die een kijk geven op een aantal gebieden van onderzoek van het instituut, met vermelding van enkele tot dusver geboekte resultaten. Tot besluit wordt de lezer uitgenodigd, evenals bij vroegere gelegenheden in dit tijdschrift, een vluchtige blik te werpen op de historie: dr. Ten Doesschate te Utrecht heeft op ons verzoek in een artikel geschetst, hoe men is gekomen tot het meten van menselijke reactietijden — een taak die thans in het Instituut voor Perceptie Onderzoek een centrale plaats inneemt.

HET INSTITUUT VOOR PERCEPTIE ONDERZOEK

door J. F. SCHOUTEN *). 159.938

Bij het ontwikkelen van talloze industriële produkten moet rekening worden gehouden met de eigenschappen van het menselijk gehoor en gezicht. Wanneer het gaat om bedienbaarheid en hanteerbaarheid, komt bij deze produkten bovendien het menselijk vermogen tot het verrichten van handelingen in het geding. In de sfeer van het Philipsconcern liggen hiervan de voorbeelden voor het grijpen. Men denkt allereerst aan: radio, grammofoon, hoorapparaten, verlichting en televisie. Evenzeer echter gelden de genoemde gezichtspunten voor: meetinstrumenten, röntgeninstallaties, telefoontoestellen, huishoudelijke apparaten, enz.

De industrie dient dus bij de ontwikkeling en vormgeving van zulke produkten niet alleen rekening te houden met de evoluerende mogelijkheden en de beperkingen van de techniek, doch tevens met de mogelijkheden en beperkingen van het waarnemen, het verwerken van waarneming en het handelen van de mens die de produkten moet gebruiken.

De industrie moet eveneens rekening houden met de vermogens van de mens die de produkten moet maken. De methodes, werktuigen en machines in de industrie moeten zodanig aan de industriële werker zijn aangepast dat deze zijn taak zo doelmatig mogelijk kan vervullen. Bovendien moet het werk zo zijn ingericht dat hij hierin zijn individuele kwaliteiten zo goed mogelijk tot ontplooiing kan brengen.

Bij de voortschrijdende verfijning van de industriële produkten en werkwijzen worden beide gezichtspunten steeds belangrijker. Gewoonlijk immers blijkt de aandacht voor de menselijke aspecten achter te blijven bij die voor de zuiver technische aspecten.

Het gaat hier om de subjectieve verschijnselen bij de mens, die overal optreden waar hij in aanraking komt met de buitenwereld. Enerzijds is dit het geval bij de waarneming en het verwerken van de waarneming (perceptie) tot b.v. een herkenning, een mening of een besluit; anderzijds bij de handeling (en de besturing van deze handeling) waarmee de mens op de buitenwereld ageert: een materieel ingrijpen of een verstrekken van informatie in de vorm van gebaar, woord of geschrift.

Men kan deze cyclus van verschijnselen, bestaande uit waarneming, verwerking, handeling en besturing, de informatieve cyclus noemen — dit ter onderscheiding van andere cyclussen die in het

*) Instituut voor Perceptie Onderzoek, Eindhoven.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

levensproces een rol spelen, met name de metabolische cyclus, welke bestaat uit het opnemen en verteren van voedsel en het uitscheiden van afvalprodukten (zie *fig. 1*).

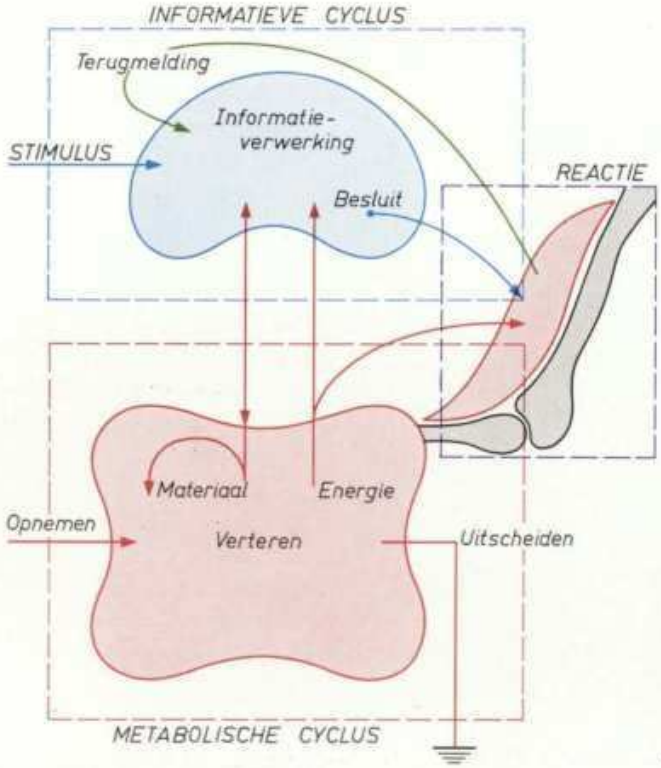


Fig. 1. Schematische voorstelling van het reageren van een organisme (mens of dier) in verband met de informatieve en de metabolische cyclus.

Dit vervangingsschema is eveneens van toepassing enerzijds voor deelstructuren van organismen, zoals organen (hart, speekselklier, oog enz.) en cellen (spiercel, zenuwcel enz.), en anderzijds voor samenlevingen van organismen en voor „organisaties" (familie, kudde, zwerm; bedrijf, vereniging, staat enz.).

Ten aanzien van de arbeid, geleverd bij de informatieve cyclus, onderscheidt men energetische arbeid (tillen, sjouwen enz.), die in een fysische energiemaat is uit te drukken, en perceptieve arbeid, waarvoor dit niet het geval is (luisteren, lezen, tellen, rekenen, sorteren, monteren, controleren, besturen enz.). De toenemende mechanisering van de industriële werkzaamheden gedurende de laatste eeuw betekent een toenemende verschuiving van energetische naar perceptieve arbeid. Binnen het kader van de perceptieve industriële arbeid kan men weer spreken van een toenemende verschuiving van elementaire taken naar meer omvattende besturende en controlerende taken, door de automatisering.

Het betrekken van de menselijke aspecten in de industriële ontwikkeling vormt een onderdeel van een eigen wetenschap, die zich sinds 1940 heeft ontwikkeld en die men in de V.S. aanvankelijk heeft betiteld als „human engineering", later als „human factors analysis". In Europa heeft zich inmiddels de term „ergonomie", leer van de menselijke arbeid, ingeburgerd. Een belangrijke stoot tot de genoemde ontwikkeling werd vooral gegeven door de ontplooiing van de nieuwe disciplines van de stuurkunde of cybernetica en van de informatietheorie, gegrondvest op de nu beroemde publikaties van resp. N. Wiener [1]) en C. E. Shannon [2]). Merkwaardig genoeg vinden deze nieuwe disciplines beide hun uitgangspunt in problemen uit de telecommunicatietechniek.

Oprichting van het Instituut; het arbeidsterrein

In 1956 vatte de Directie van het Natuurkundig Laboratorium der N.V. Philips het plan op, te Eindhoven een wetenschappelijk laboratorium te stichten dat zich met de problemen rondom de menselijke informatieve cyclus zou bezighouden.

Het bleek dat de leiding van de in 1956 opgerichte Technische Hogeschool te Eindhoven in dit plan was geïnteresseerd, gezien haar beleid bij de technische opleiding mede nadruk te leggen op de samenhang van mens en techniek in de moderne maatschappij. Als resultaat hiervan besloten het Natuurkundig Laboratorium en de Technische Hogeschool gezamenlijk een laboratorium voor het genoemde doel op te richten.

Op 12 september 1957 werd de Stichting „Instituut voor Perceptie Onderzoek" verleden. Op 19 september 1958 werd een voor deze Stichting gebouwd laboratorium officieel in gebruik genomen. In het laboratorium zijn zowel stafleden van het Natuurkundig Laboratorium als stafleden en studenten van de Technische Hogeschool werkzaam. Daarnaast biedt het laboratorium regelmatig plaats aan gastwerkers.

De onderzoekingen in het laboratorium bestrijken het gebied van het horen, het zien, de spraak, het reactievermogen en de perceptieve arbeid. Vele onderwerpen sluiten nauw aan bij hetzij de informatietheorie, de stuurkunde of de ergonomie.

Deze verscheidenheid van onderwerpen is gekozen omdat het in toenemende mate noodzakelijk wordt verband te leggen tussen resultaten die uit verschillende takken van onderzoek voortkomen. Zo is het probleem van de optimale verlichtingssterkte niet oplosbaar door alleen de eigenschappen van het menselijk oog te bestuderen. Het onderzoek moet veeleer worden uitgevoerd door het bepalen van de perceptieve belasting die het werken onder verschillende verlichtingsniveaus met zich meebrengt. Evenzeer is een studie van de elementaire menselijke

[1]) N. Wiener, Cybernetics or control and communication in the animal and the machine, Hermann, Parijs 1948.

[2]) C. E. Shannon, A mathematical theory of communication, Bell Syst. tech. J. **27**, 379-423 en 623-656, 1948.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

spraakklanken onvolledig tenzij de eigenschappen van deze klanken enerzijds worden gerelateerd aan het gedrag van het menselijk oor bij het horen van willekeurige geluiden, anderzijds aan het gedrag van ons brein bij het produceren en verstaan van gehele woorden.

Zeer in het algemeen is het van belang bij de studie van de waarneming de handeling te betrekken, en bij die van de handeling de waarneming: in de uiteindelijke gedragingen van de mens zijn beide ten nauwste verweven.

Het is verder van groot belang voor de behandeling van de genoemde onderwerpen een samenwerking tot stand te brengen tussen fysici, biofysici, elektronentechnici en schakeltechnici enerzijds en psychologen, fysiologen, fonetici en taalkundigen anderzijds. Men zal dan tot algemenere conclusies kunnen komen en resultaten van grotere praktische bruikbaarheid kunnen bereiken dan wanneer er in deze studies over de gedragingen van de mens een kijk uit één enkele denkrichting overheerst.

Van de genoemde onderzoekingen bewegen die op het gebied van de perceptieve arbeid zich het meest op onontgonnen terrein. Juist hiervan echter is het praktisch belang nauwelijks te overschatten. Weliswaar zijn in de loop der jaren velerlei methodes ontwikkeld om de menselijke fabrieksarbeid te meten en te waarderen, om de administratieve arbeid aan te passen bij het menselijk vermogen tot informatieverwerking, en om werktuigen en machines zo te construeren dat zij doelmatig door een mens kunnen worden bestuurd. Deze methodes zijn echter overwegend empirisch gefundeerd, terwijl het streven moet zijn om door het wetenschappelijk onderzoek een nader inzicht te krijgen in de wetmatigheden die de beste aanpassing van de mens bij het werk en van het werk bij de mens bepalen.

Tot zover de omschrijving van het arbeidsterrein van het Instituut voor Perceptie Onderzoek. Uit het bovenstaande ziet men dat dit instituut op 12 september 1962 zijn eerste lustrum heeft kunnen vieren. Naar aanleiding hiervan zijn in dit tijdschriftnummer een reeks artikelen bijeengebracht die een overzicht geven van een aantal thans aan de gang zijnde onderzoekingen. Ter inleiding van die artikelen laten we hier nog enkele gedachten van algemene aard volgen.

Psychofysische metingen

Alle menselijke gedragingen zijn wisselvallig, zelfs onder zeer constant gehouden omstandigheden zoals men die in een laboratorium kan verwezenlijken. Waarnemingen, noch overwegingen, noch handelingen spelen zich op een exact herhaalbare wijze af.

Dit zou ons op zichzelf niet zozeer hoeven te ontmoedigen, aangezien ook de verschijnselen in de dode natuur door wisselvalligheden zijn gekenmerkt. Bij de mens echter spelen ook nog bewuste en onbewuste factoren een rol, zoals belangstelling, motivering, vooringenomenheid, hoop of vrees. Hierdoor zal hij van geval tot geval en van moment tot moment anders waarnemen of reageren. Deze additionele subjectiviteit in de menselijke gedragingen is een ernstige complicatie als we willen trachten door kwantitatieve metingen iets omtrent de mens vast te stellen.

Om de genoemde factoren zoveel mogelijk uit te sluiten, leggen vele onderzoekers er zich op toe, hun proeven uit te voeren met zg. naïeve proefpersonen, van wie te verwachten is dat zij met een minimale vooringenomenheid aan de proeven deelnemen. Deze minimale vooringenomenheid brengt echter dikwijls een weinig kritische instelling met zich mee, zodat het gevaar dreigt dat nieuwe verschijnselen, die de proefleider nog onbekend waren en die misschien juist van belang zouden kunnen zijn, over het hoofd worden gezien.

Naar onze mening verdient het daarom de voorkeur te werken met ervaren waarnemers, die de probleemstelling kennen en begrijpen. Weliswaar kan hun vooringenomenheid de resultaten van de metingen beïnvloeden; moet zulk een waarnemer b.v. de toonhoogte van een klank vaststellen, dan kan het resultaat zelf reeds worden beïnvloed door wat hij verwacht te horen. Dit is echter slechts het geval binnen bepaalde en dikwijls meetbare grenzen. Daarmede wordt dan juist een inzicht verkregen in de mate van betrouwbaarheid van de meting aan dergelijke subjectieve verschijnselen. Waarnemen, zelfs in de meest primitieve zin, is nu eenmaal een kunst die slechts door oefening wordt geleerd. In het primitieve geval behelst dit niet meer dan het aankweken van een automatisme, op het hogere plan van de wetenschappelijke waarneming moet men een beroep doen op een kritische introspectie, die de van invloed zijnde factoren misschien niet kan uitschakelen, maar ze althans aan het licht brengt.

Het voordeel van het werken met ervaren waarnemers weegt derhalve, vooral bij het pionieronderzoek, op tegen het nadeel dat zij met hun verwachtingen in de resultaten betrokken zijn. Latere proeven met naïeve waarnemers leveren dan een controle of de waargenomen verschijnselen zich ook aan onbevangen proefpersonen voordoen.

De metingen die op dit gebied kunnen worden uitgevoerd, worden sinds Fechner [3]) veelal aangeduid

[3]) G. Th. Fechner, Elemente der Psychophysik, Leipzig 1859

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

als psychofysische metingen. Het woord duidt aan dat verschijnselen van psychologische aard (zoals reactietijden, maar ook gewaarwordingen, b.v. van helderheid, kleur, vorm, luidheid, toonhoogte, timbre) worden onderzocht met fysische methodes. Nu kan men bij fysische metingen een willekeurig instrument op verschillende manieren gebruiken, nl. om te constateren of een uitslag verdwijnt (nulinstrument), of er juist een kleinste mogelijke uitslag optreedt of een kleinste mogelijke verandering van uitslag, of een uitslag groter of kleiner is dan in een voorafgaand geval, en ten slotte — indien de schaal in eenheden is geijkt — om een uitslag werkelijk af te lezen. Volgens dit gezichtspunt kan men ook de psychofysische metingen indelen, waarbij echter de proefpersoon de rol speelt van het instrument dat wordt gadegeslagen. Men heeft dus de volgende gevallen:

1) Gelijkstelling. Men gebruikt b.v. het oog als nulinstrument en men bepaalt de objectieve relatie tussen de fysische gegevens van twee gekleurde lichtbronnen die tot een zelfde kleur- en helderheidsindruk aanleiding geven.
2) Absolute drempels. Men bepaalt de fysische drempel waarbij een geluid of licht juist hoorbaar of zichtbaar wordt, of hinder gaat veroorzaken.
3) Verschildrempels (onderscheidingsvermogen). Men bepaalt de fysische veranderingen, nodig om een juist merkbaar verschil in helderheid, kleur, luidheid, toonhoogte enz. teweeg te brengen.
4) Rangschikking. Men bepaalt een volgorde van objectieve stimuli naar de subjectieve indruk van groter of kleiner, helderder of donkerder, hoger of lager, enz.
5) Maatgeving. Men bepaalt de kwantitatieve relatie tussen de objectieve stimulus en de subjectieve indruk op basis van een subjectieve schaal. De subjectieve waarneming kan nl. in bepaalde gevallen wel degelijk een kwantitatief karakter hebben. Zo kan een muzikaal getrainde waarnemer toonhoogteverschillen niet alleen uitdrukken in termen van hoger of lager, doch zelfs met grote precisie in een interval: grote terts, kwint, octaaf, overeenkomende met de objectieve frequentieverhoudingen 4:5, 4:6, 4:8.

In dit hoofdstuk moge ten slotte worden gewezen op een punt waaraan in ons instituut veel aandacht is besteed. Sommige metingen van subjectieve verschijnselen vereisen — wegens de genoemde wisselvalligheden — het verrichten van grote series waarnemingen. Terwijl het uitdenken en voorbereiden van de proeven en de latere uitwerking van de resultaten de onderzoeker vaak alle gelegenheid geven zijn vindingrijkheid resp. zijn analytisch vermogen te gebruiken, kan datzelfde veelal niet worden gezegd van de nogal geestdodende eigenlijke uitvoering van de metingen. Voor de uitvoering van proeven die zich hiervoor lenen wordt derhalve gestreefd naar een verregaande automatisering. Dit streven, dat op sprekende wijze wordt geïllustreerd door de in dit tijdschriftnummer beschreven reactiemeter „DONDERS", kan worden gezien als een poging tot verhoging van de wetenschappelijke produktiviteit, in die zin dat de wetenschappelijke onderzoekers niet een onevenredig deel van hun tijd hebben te besteden aan werk waarin van hun specifieke begaafdheid nauwelijks gebruik wordt gemaakt. Op deze wijze gezien past het invoeren van een dergelijke automatisering in het kader van de aanpassing van methodes en werktuigen aan de werker die wij in het begin van dit artikel als belangrijk voor de industrie hebben beschreven, maar die evengoed van belang is voor het werk in een laboratorium, en zelfs voor de wijze waarop een ieder in de particuliere sfeer zijn leven organiseert.

Literatuur

Colin Cherry, On human communication, Chapman & Hall, Londen 1957.
D. E. Broadbent, Perception and communication, Pergamon Press, Londen 1958.
W. A. Rosenblith, Sensory communication, Wiley, New York 1961.
S. S. Stevens, Handbook of experimental psychology, Chapman & Hall, Londen 1951.
S. T. Bok, Cybernetica. Hoe sturen wij ons leven, ons werk en onze machines, Het Spectrum, Utrecht 1958.

Samenvatting. Korte schets van het tot stand komen van het Instituut voor Perceptie Onderzoek als een gemeenschappelijke stichting door het Natuurkundig Laboratorium der N.V. Philips en de Technische Hogeschool te Eindhoven. In september 1962 vierde het instituut zijn eerste lustrum. Naar aanleiding hiervan wordt een groep van vijf artikelen over verschillende in het instituut aan de gang zijnde onderzoekingen gepresenteerd. Het onderhavige artikel leidt deze artikelen in met een algemene beschouwing over de doelstelling van het instituut en over de problemen van psychofysische metingen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

DE TOONHOOGTEGEWAARWORDING

door R. J. RITSMA *) en B. LOPES CARDOZO *). 534.321

Overzicht; sinustrillingen en samengestelde geluiden

De toonhoogtegewaarwording, die bij enigszins geoefende personen een verbluffende nauwkeurigheid kan hebben, berust op een mechanisme dat nog maar ten dele begrepen is. We willen in dit artikel een beknopte uiteenzetting geven omtrent de inzichten betreffende de toonhoogtegewaarwording die thans als vaststaand mogen worden beschouwd, en een aantal experimenten beschrijven waarop deze inzichten berusten.

Ter vermijding van misverstand, beginnen we met op te merken dat de waargenomen toonhoogte een subjectieve grootheid is en derhalve met psychofysische methodes gemeten moet worden [1]). Ook mag de toonhoogte niet zonder meer geïdentificeerd worden met een geluidsfrequentie. Integendeel: het doel van onderzoek betreffende de toonhoogtegewaarwording is juist om te vinden hoe de waargenomen toonhoogte afhangt van de diverse parameters waarmee een bepaald geluid beschreven kan worden. Onderzoek hieromtrent is mogelijk dank zij het feit dat de toonhoogte een „ééndimensionele" grootheid is: van twee tonen kan altijd worden vastgesteld of ze even hoog zijn, en zo neen, welke de hoogste is. Met behulp van deze eigenschap kan iemand de toonhoogte die hij aan een zeker geluid toekent, altijd vergelijken met die van een referentietoon, en aldus kan men de moeilijkheid omzeilen dat de toonhoogte, zoals elke gewaarwording, niet toegankelijk is voor directe waarneming.

Uit hetgeen volgt, zal blijken dat men verschil moet maken tussen geluiden die bestaan uit één enkele sinustrilling, en geluiden die een samengesteld spectrum vertonen. Bij de eerste mag men wèl op de gebruikelijke wijze de frequentie als maat voor de toonhoogte beschouwen. Dit maakt het b.v. mogelijk een muzikale toonreeks te noteren als een reeks getallen. Een samengesteld geluid echter kan een toonhoogte hebben zodanig dat de frequentie van een even hoog klinkende sinustoon niet overeenkomt met een der in het spectrum voorkomende frequenties, noch daaruit eenvoudig afgeleid kan worden. Voorbeelden hiervan vindt men in de slagtoon van kerkklokken en in de menselijke stem [2]).

We zullen hieronder aantonen dat het laatstgenoemde verschijnsel niet verklaard kan worden uitgaande van de tot voor kort algemeen aanvaarde zg. plaatstheorie, en vervolgens aangeven in welke richting de oplossing waarschijnlijk gezocht moet worden. Eerst geven we aan de hand van *fig. 1* een korte recapitulatie van deze theorie [3]).

In fig. 1*a* ziet men een schematische afbeelding van het menselijk gehoororgaan. Links de uitwendige gehoorgang, door het trommelvlies gescheiden van het middenoor, en rechts het binnenoor. Dit laatste bestaat uit een langwerpige ruimte (35 mm lang) die gevuld is met vloeistof en in de lengterichting in tweeën verdeeld door het cochleaire tussenschot, dat door geluiden in trilling gebracht wordt. Dit tussenschot bestaat o.a. uit het basilaire membraan waarin de zg. haarcellen van Corti liggen.

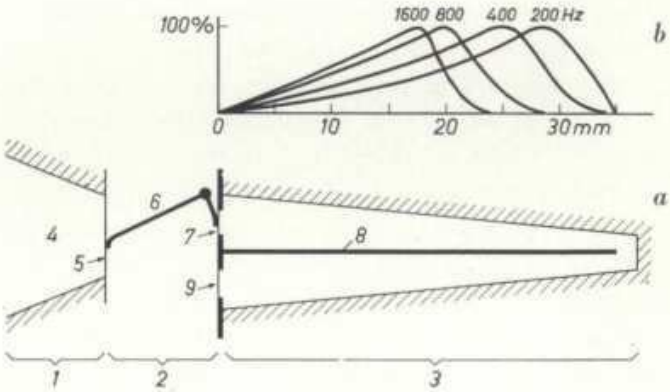


Fig. 1. *a*) Schematische voorstelling van het menselijke oor. Van links naar rechts ziet men het uitwendige deel van het oor (*1*), het middenoor (*2*) en het binnenoor (*3*). De luchttrillingen bereiken via de gehoorgang *4* het trommelvlies *5*. De beweging hiervan wordt via de gehoorbeentjes *6* (schematisch getekend als hefboom met een lange en een korte arm) overgebracht op het ovale venster *7*, dat het binnenoor afsluit. Door de vloeistof in het binnenoor beweegt zich dientengevolge een drukgolf, die het cochleaire tussenschot *8* in beweging brengt en zodoende de daarin gelegen uiteinden van de gehoorzenuw prikkelt. Het bij sinustonen van diverse frequenties behorende amplitudepatroon van deze beweging vindt men geschetst in (*b*). De top van zo'n curve ligt dichter bij het eind van het tussenschot naarmate de frequentie lager is. De voor het bewegen van *7* vereiste vloeistofbeweging is mogelijk door de aanwezigheid van het (elastische) ronde venster *9*. In werkelijkheid is de ruimte *3* opgerold tot een spiraal (het zg. slakkenhuis).

*) Instituut voor Perceptie Onderzoek, Eindhoven.

[1]) Zie het eerste artikel in dit nummer: J. F. Schouten, Philips techn. T. **24**, 337-340, 1962 (no. 11/12).

[2]) Zie b.v. A. Cohen, Het fonetisch onderzoek, Philips techn. T. **24**, 348-353, 1962 (no. 11/12).

[3]) Men vindt de plaatstheorie uitvoerig behandeld o.a. in H. Fletcher, Speech and hearing in communication, Van Nostrand, New York 1953.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Deze vormen de uitlopers van de gehoorzenuw en detecteren de uitwijking van het desbetreffende punt van het basilaire membraan. In werkelijkheid is het getekende deel van het binnenoor opgerold, het draagt daarom de naam slakkenhuis [4]). Volgens de plaatstheorie nu correspondeert, kort samengevat, ten eerste met iedere frequentie een bepaalde plaats op het cochleaire tussenschot, en, ten tweede, met iedere plaats een bepaalde toonhoogte.

Voor *sinustonen* kan men datgene wat gebeurt, inderdaad aldus schematisch samenvatten: dank zij de onderzoekingen van Von Békésy[5]) weten we thans dat de lopende golven die via het ovale venster in de vloeistof van het binnenoor teweeggebracht worden wanneer een geluidstrilling het trommelvlies treft, sneller „gedempt" worden naarmate de frequentie hoger is; alleen golven met vrij lage frequentie „lopen door" tot het eind van het binnenoor. Men vindt dit geïllustreerd in fig. 1*b*, waar voor enige frequenties het verloop van de amplitude als functie van de plaats op het tussenschot (schematisch) is uitgezet. De zojuist genoemde, met een frequentie corresponderende, plaats op het cochleaire tussenschot kan geïdentificeerd worden met de abscis van de top van de desbetreffende kromme, d.w.z. met de plaats waar het tussenschot het sterkst wordt geëxciteerd. Men mag het binnenoor dus inderdaad opvatten als een frequentie-indicator.

Het blijkt dat men het binnen zekere grenzen zelfs mag opvatten als een frequentie-analysator: in beperkte mate is het oor in staat om in een willekeurig geluid de sinustonen waaruit dit is samengesteld, afzonderlijk te identificeren. Men kan dit b.v. constateren bij het volgende experiment. Beluistert men het samengestelde geluid dat wordt teweeggebracht door een periodieke impuls, dan ervaart men dit geluid bij de eerste kennismaking als één toon met een scherp timbre. Wordt een der lagere harmonischen uit het spectrum van zo'n impulstoon weggenomen (*fig. 2*), dan wordt het timbre nog iets scherper. Wordt vervolgens deze harmonische weer toegevoegd, dan hoort men hem, nu de aandacht op zijn bestaan gevestigd is, daarna
I als afzonderlijke toon.

Uit experimenten van het volgende type blijkt dat voor samengestelde geluiden de tweede bewering van de plaatstheorie — „met iedere plaats op het cochleaire tussenschot correspondeert een zekere toonhoogte" — niet opgaat. Men maakt b.v. een melodie (zie *fig. 3a*) van tonen die op dezelfde wijze gegenereerd worden als hierboven. De toonhoogte wordt gevarieerd door de herhalingsfrequentie van de impulsen te variëren. Door middel van een filter echter worden van het geluidsspectrum van deze tonen alleen de componenten doorgelaten waarvan de frequenties tussen ca. 2000 en 3000 Hz liggen. Toch corresponderen de waargenomen toonhoogten met die van de in fig. 3*a* genoteerde noten, d.w.z. met de hoogte van sinustonen van ca. 200 tot 300 Hz. IIa

Verschuift men bij een dergelijk experiment de ligging van het doorgelaten frequentiegebied (fig. 3*b*), dan ervaart de luisteraar de verandering van frequentiegebied slechts als een verandering van timbre, *niet* als een verandering van toonhoogte. De toonhoogten corresponderen steeds met die van de IIb genoteerde noten.

In alle gevallen wordt dus een toonhoogte waargenomen gelijk aan die van een sinustoon met een frequentie die ver beneden de ondergrens van het doorgelaten gebied ligt, en die dus in 't geheel niet correspondeert met de geëxciteerde plaats van het cochleaire tussenschot.

Een samengesteld geluid dat zich aan het oor voordoet als een enkele toon waarvan de hoogte

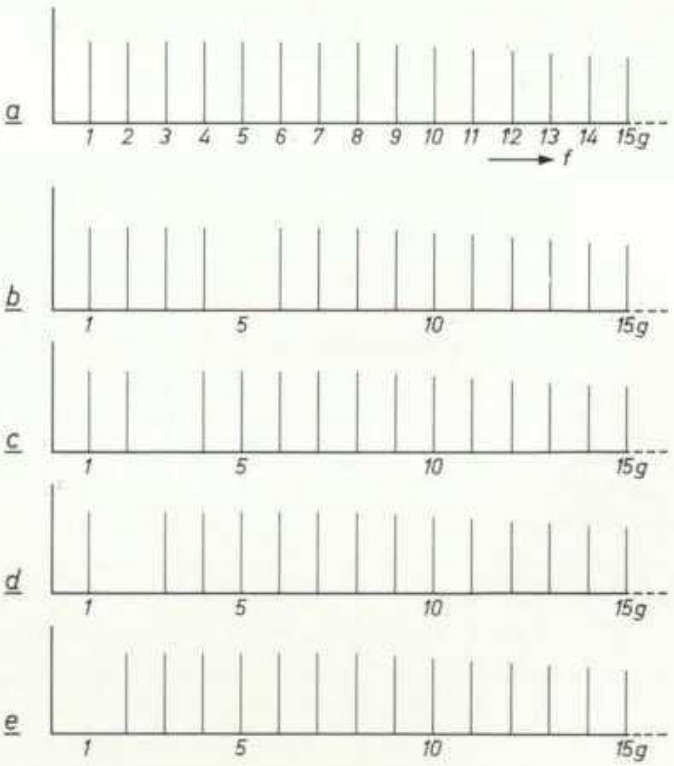


Fig. 2. *a*) Spectrum van een impulstoon, d.i. de toon die teweeggebracht wordt door een periodieke impuls van zeer korte duur. Uitgezet is de intensiteit der spectrumlijnen tegen hun frequentie (f) uitgedrukt als veelvoud van de grondfrequentie g. Het spectrum bestaat uit een zeer groot aantal ongeveer even sterke harmonischen.
b), *c*), *d*) en *e*) Hetzelfde na verwijdering van resp. de 5e, 3e, 2e en 1e harmonische. In alle gevallen correspondeert de toonhoogte met die van de grondtoon; er is alleen verschil in timbre.

[4]) Zie voor een anatomische beschrijving b.v. E. G. Wever en M. Lawrence, Physiological acoustics, Princeton University Press, Princeton 1954.

[5]) Zie G. von Békésy, Experiments in hearing, McGraw-Hill, New York 1960.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

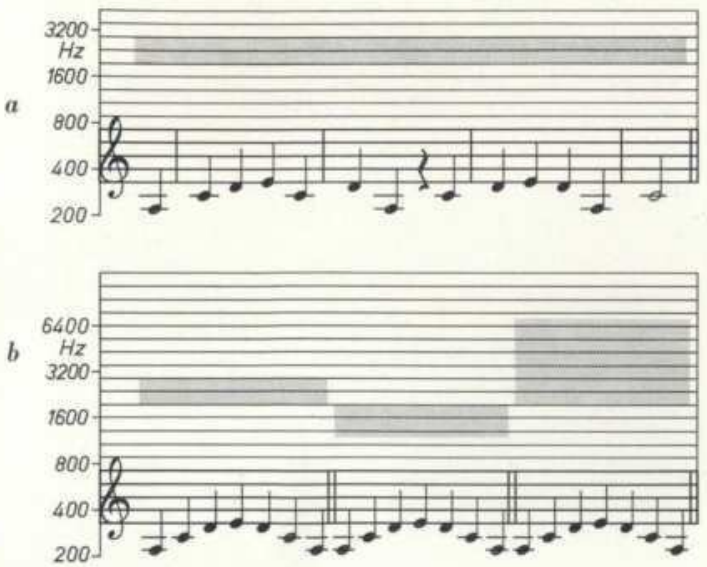


Fig. 3. *a*) Maakt men een melodie van impulstonen (herhalingsfrequentie 200-300 Hz) waarvan alleen de harmonischen die tussen 2000 en 3000 Hz liggen, worden doorgelaten, dan correspondeert toch de toonhoogte met die van de genoteerde noten. Het gebied van de doorgelaten harmonischen is de geschaduwde strook in het bij de notenbalk behorende hulplijnensysteem. (Een notenbalk, plus hulplijnen, kan beschouwd worden als een rechthoekig coördinatensysteem met als ordinaat de logaritme van de met de toonhoogte corresponderende frequentie.)
b) Bij verschuiving van het doorgelaten frequentiegebied (zie de diverse geschaduwde stroken) blijkt alleen het timbre van de tonen te veranderen, niet de hoogte.

niet correspondeert met een der aanwezige frequenties, noemen wij residu [6]). Deze naam is ontstaan doordat het beschreven merkwaardige verschijnsel ten aanzien van de toonhoogte voor het eerst is waargenomen aan een impulstoon (zie boven) waaraan alle afzonderlijk waarneembare (lagere) harmonischen onttrokken waren; de resterende groep harmonischen mocht daar met recht „residu" heten. Later is gevonden dat een groep van slechts drie opeenvolgende harmonischen, b.v. de 8e, 9e en 10e het residu-effect reeds vertoont. We merken nog op dat het anderzijds niet noodzakelijk is dat alle afzonderlijk hoorbare harmonischen geëlimineerd zijn.

Nadere beschouwing van het residu-effect

Het bestaan van het residu-effect als zelfstandig fenomeen is lange tijd in twijfel getrokken. Men meende dat een toon van de waargenomen hoogte wèl reëel in het oor aanwezig zou zijn; deze toon zou niets anders zijn dan een verschiltoon, ontstaan door niet-lineaire vervorming in het oor. Ware deze verklaring juist, dan zou de plaatstheorie in volle omvang zijn geldigheid kunnen behouden.

[6]) Zie J. F. Schouten, De toonhoogtegewaarwording, Philips techn. T. **5**, 298-306, 1940.

Bij niet-lineaire vervorming kan men het verband tussen het ingangssignaal $V_i(t)$ en het uitgangssignaal $V_u(t)$ algemeen formuleren als:

$$V_u(t) = C\,[V_i(t) + \delta_1 V_i^2(t) + \ldots] \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

met constanten C, $\delta_1, \ldots$ Heeft men een ingangssignaal bestaande uit twee even sterke sinustrillingen:

$$V_i(t) = A(\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t), \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

dan vindt men volgens (1) voor het uitgangssignaal (we stellen $C = 1$):

$$V_u(t) = V_i(t) + \delta_1 A^2\,[1 - \tfrac{1}{2}\cos 2\omega_1 t - \tfrac{1}{2}\cos 2\omega_2 t + \\ + \cos(\omega_1 + \omega_2)t + \cos(\omega_1 - \omega_2)t] + \ldots \; .$$

Het oorspronkelijke signaal wordt dus door de niet-lineaire vervorming o.m. „verontreinigd" met een trilling met frequentie $(\omega_1 + \omega_2)$ en een met frequentie $(\omega_1 - \omega_2)$. In de geluidsleer noemt men deze resp. de somtoon en de verschiltoon. Het bestaan van deze tonen is door musici reeds beschreven in het midden van de 18e eeuw (G. A. Sorge 1744; G. Tartini 1754).

Men kan tegen de verschiltoonhypothese een aantal onderling zeer verschillende argumenten aanvoeren:

1) Het residu-effect treedt óók op bij geluiden die zo zwak zijn dat niet-lineaire vervorming uitgesloten geacht moet worden.
2) De residutoon geeft met een sinustoon van ongeveer gelijke toonhoogte geen zwevingsverschijnselen.
3) Men kan de residutoon, in tegenstelling tot een even hoge sinustoon, niet overstemmen (zg. maskeren) door ruis waarvan het frequentiespectrum zich uitstrekt rondom de frequentie f_p die correspondeert met de waargenomen toonhoogte; wèl door ruis waarvan het spectrum de componenten van het residu omvat [7]); zie *fig. 4.* III

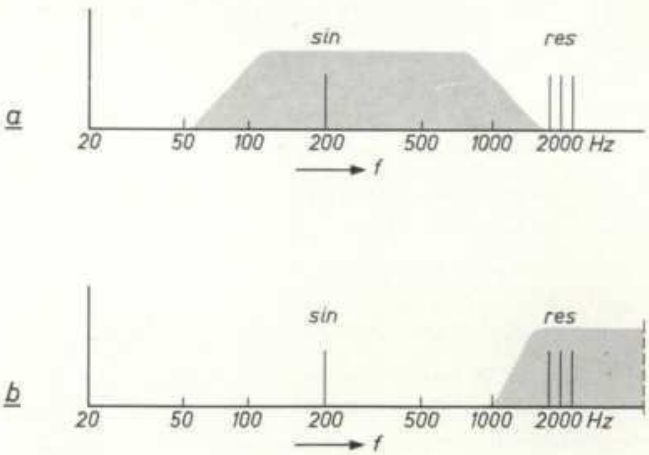


Fig. 4. Maskeren door middel van ruis toont aan dat de residutoon niet als verschiltoon in het oor ontstaat. Kiest men het ruisspectrum ongeveer als correspondeert met de schaduwpartij in (*a*), dan verdwijnt een sinustoon van 200 Hz (*sin*), maar niet de even hoog klinkende residutoon die afkomstig is van het complex *res* (frequenties 1800, 2000 en 2200 Hz). Kiest men het ruisspectrum als in (*b*), dan verdwijnt juist de residutoon en blijft de sinustoon hoorbaar.

[7]) Dit is het eerst aangetoond door J. C. R. Licklider, J. Acoust. Soc. Amer. **26**, 945, 1954.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

4) Een onomstotelijk argument tegen de verschiltoonhypothese vindt men in het verschijnsel dat de residutoonhoogte niet altijd met de verschilfrequentie correspondeert. Men kan dit o.a. constateren bij een experiment van het volgende type.

Men gaat b.v. uit van een residu van drie componenten met frequenties 1800, 2000 en 2200 Hz, d.w.z. de 9e, 10e en 11e harmonische van 200 Hz. De toonhoogte correspondeert met 200 Hz ($f_p = 200$ Hz). Vervolgens verhoogt men alle frequenties met een gelijk bedrag, b.v. 10 Hz, en men herhaalt dit enige malen, b.v. tot ongeveer 1850, 2050 en 2250 Hz. Hoewel het frequentieverschil van de componenten bij deze operatie constant blijft (200 Hz), hoort men de residutoonhoogte stijgen. Als de frequenties de laatstgenoemde waarden bereikt hebben, is f_p gestegen tot bijna 205 Hz (*fig. 5*). Laat men op dezelfde wijze de frequenties afnemen, dan daalt de residutoonhoogte.

IV

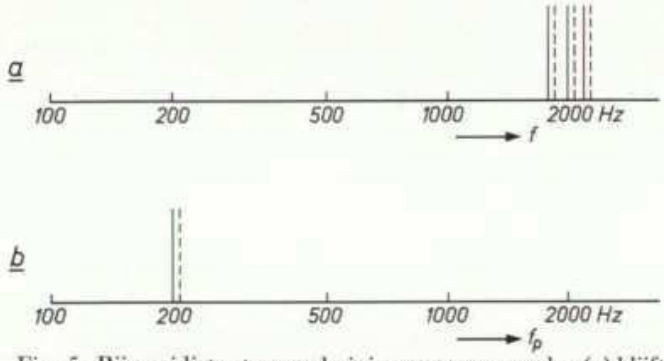


Fig. 5. Bij equidistante verschuiving van een complex (*a*) blijft de residutoonhoogte (dit is de in (*b*) uitgezette frequentie f_p van een even hoog klinkende sinustoon) niet constant, maar verandert evenredig met de middelste frequentie f van de component van het complex.

De toonhoogte van een complex van drie componenten

Het eenvoudigste complex waaraan het residueffect kan worden waargenomen, bestaat uit drie sinustrillingen met gelijk onderling frequentieverschil. Afgezien van de luidheid en de onderlinge sterkteverhouding, die we beide even buiten beschouwing laten, kan men zo'n complex beschrijven met slechts twee parameters, de frequentie f van de middelste component en het frequentieverschil g. Proeven van het zojuist beschreven type hebben geleerd dat variatie van f bij constant blijvende g (equidistante verschuiving) de toonhoogte f_p evenredig met f doet veranderen [8]). Dit wil echter niet zeggen dat bij toenemende f de toonhoogte voortdurend stijgt. Gaat men uit van een complex dat b.v., evenals in het boven beschreven experiment, uit een 9e, 10e en 11e harmonische bestaat ($f = 10g$), dan springt bij $f \approx 10{,}5g$ de toonhoogte omlaag [9]). Bij verdere stijging van f stijgt f_p weer, om bij $f = 11g$ opnieuw de waarde g te bereiken. Aanvankelijk is $f_p = f/10$, na de sprong $f/11$ enz. Het verloop van f_p met f heeft dus het karakter van een zaagtand; de toonhoogte correspondeert slechts dan met het frequentieverschil ($f_p = g$) als f een geheel veelvoud van g is (*fig. 6*).

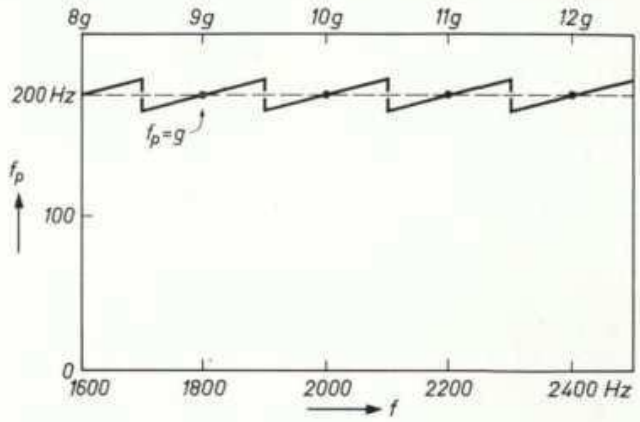


Fig. 6. Bij equidistante verschuiving van een complex van drie componenten (frequentie van de middelste f, frequentieverschil g) blijft f_p niet onbeperkt met f toenemen. Als f de afstand naar een volgend veelvoud van g ongeveer halverwege heeft afgelegd, maakt f_p een sprong zodat bij het bereiken van dat veelvoud f_p weer gelijk is aan g.

Men kan de evenredigheid tussen f_p en f op de volgende wijze verklaren uit de fijnstructuur van het akoestische signaal. Deze zag er bij onze proeven uit als geschetst is in *fig. 7*. Er is een trilling met frequentie f (de getrokken lijn) waarvan de amplitude met een diepte van 100% gemoduleerd wordt met de frequentie g (streeplijn); op deze wijze werd het

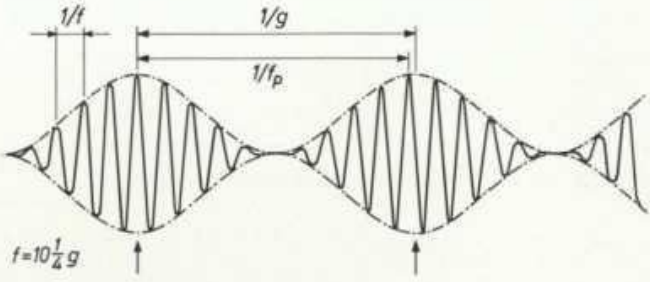


Fig. 7. Ter verklaring van het verschijnsel dat, bij equidistante verschuiving van een complex van drie componenten, de residutoonhoogte f_p evenredig varieert met de centrale frequentie f. Het geluidssignaal wordt voorgesteld door de getrokken lijn (sinustrilling met frequentie f, voor 100% gemoduleerd met frequentie g). Het oor leidt de toonhoogte weliswaar af uit de periodiciteit van het signaal, maar in die zin dat het als zodanig beschouwt de afstand van de pieken die binnen iedere periode $1/g$ het dichtst bij de toppen (zie pijltjes) van de streeplijn liggen. Deze afstand is uiteraard een veelvoud van de afstand $1/f$. Indien niet f tevens een veelvoud van g is (anharmonisch complex), verschilt f_p dus van g.

[8]) J. F. Schouten, R. J. Ritsma en B. Lopes Cardozo, Pitch of the residue, J. Acoust. Soc. Amer. **34**, 1418-1424, 1962 (no. 9 II).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

signaal trouwens ook verkregen. Blijkbaar correspondeert nu de waargenomen toonhoogte met de periodiciteit van de amplitudemodulatie, met dien verstande dat het gehoor die afleidt uit de afstand van de pieken die het dichtst bij de toppen van de streeplijn liggen [9]). Deze afstand is uiteraard evenredig met de afstand $1/f$. In formule: $1/f_p = n/f$. Neemt f zover toe dat de afstand $1/g$ van de genoemde toppen beter benaderd wordt door op een naburige piek over te gaan, d.w.z. voor n een getal te kiezen dat één groter is, dan verspringt de toonhoogte. Deze redenering verklaart ook dat $f_p = g$ is wanneer f een geheel veelvoud van g is.

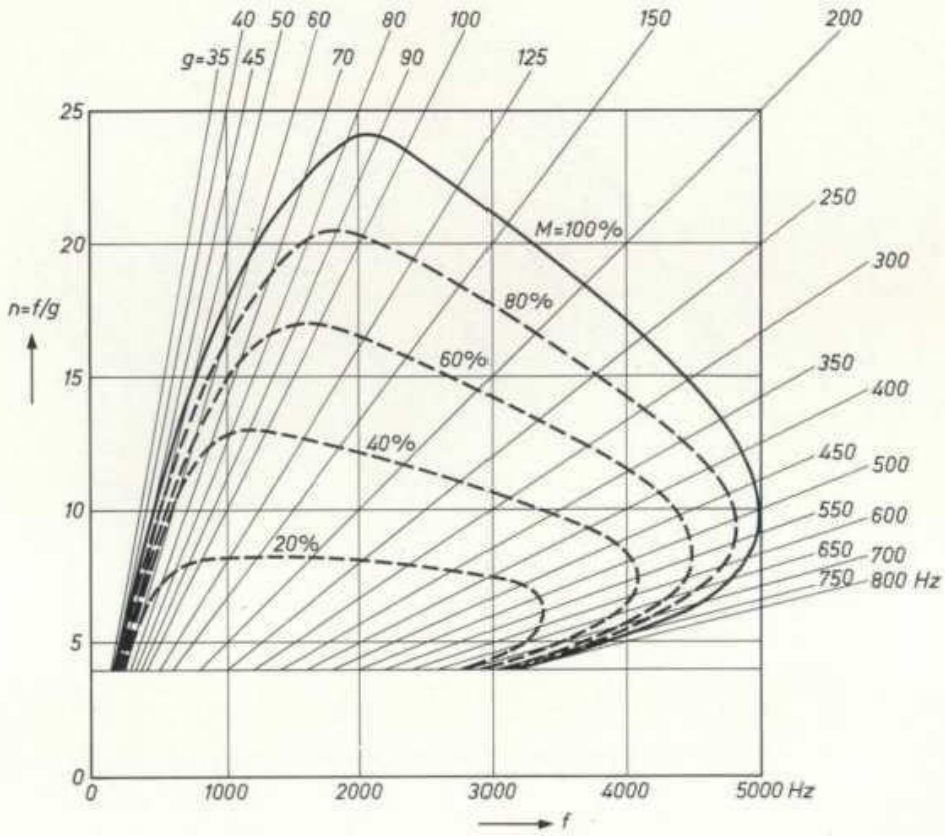


Fig. 8. Existentiegebied van de residutoon van een complex van drie naburige harmonischen (frequentie van de middelste f, grondfrequentie g): de residutoon wordt waargenomen in het gebied binnen de getrokken kromme. Maakt men de twee buitenste componenten zwakker (experimenteel: door de trilling f niet tot een diepte $M = 100\%$ te moduleren, maar minder diep), dan wordt het existentiegebied kleiner.

Het bovenstaande leidt tot de conclusie dat het orgaan dat de toonhoogte van complexe geluiden vaststelt, zich niet in het mechanische deel van het oor bevindt, maar van neurale aard is; het moet zich bevinden in de gehoorzenuw of de hersenen. Blijkbaar is het niet zozeer een spectrograaf als wel een soort tijdmeter die de fijnstructuur van het signaal analyseert [10]).

Tot slot van dit hoofdstuk zij erop gewezen dat het residu-effect niet bij iedere willekeurige combinatie van frequenties optreedt [11]). In *fig. 8* zijn de grenzen van het zg. existentiegebied van het residu-effect voor een complex van drie componenten grafisch aangegeven. Langs de abscis is hier de frequentie f uitgezet, langs de ordinaat het quotient n van f en g. De hellende rechten zijn lijnen van constante g. We beschouwen voorlopig alleen de getrokken kromme $M = 100\%$. Bij de combinaties van f- en n-waarden waarvan de grafische voorstelling binnen het door deze kromme omsloten gebied valt, is een residutoonhoogte waarneembaar; daarbuiten niet. Hoewel de vorm van de curve wat de details betreft niet voor alle personen dezelfde is, geldt toch wel algemeen dat de hoogste f-waarde optreedt bij een n van ruim tien, en de grootste n-waarde bij $f = 2000$ tot 3000 Hz. De laagste g — d.i. dus tevens ongeveer de laagste f_p — is ongeveer 35 Hz, de hoogste ruwweg 800 Hz.

Experimenteert men met een qua frequenties identiek complex waarbij de componenten met de frequenties $(f-g)$ en $(f+g)$ minder sterk zijn, dan is het existentiegebied kleiner. Het trillingspatroon van zo'n complex is in principe gelijk aan dat van fig. 7, met dien verstande dat de modulatiediepte M kleiner is dan 100%. De streeplijnen in fig. 8 geven de grens van het existentiegebied voor de bijgeschreven waarden van M. Het kleiner worden van het existentiegebied met afnemende M verklaart waarom men de residutoon op zeker ogenblik hoort verdwijnen wanneer men van een complex van drie componenten de twee buitenste in sterkte laat afnemen.

---

[9]) Vgl. ook E. de Boer, On the „residue" in hearing, diss. Amsterdam, 1956.

[10]) R. J. Ritsma, A model of human pitch-extraction based on additive correlation, Proc. 4th int. Congr. Acoust. I, Kopenhagen 1962, ter perse.

[11]) R. J. Ritsma, Existence region of the tonal residue I, J. Acoust. Soc. Amer. **34**, 1224-1229, 1962 (no. 9 I).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

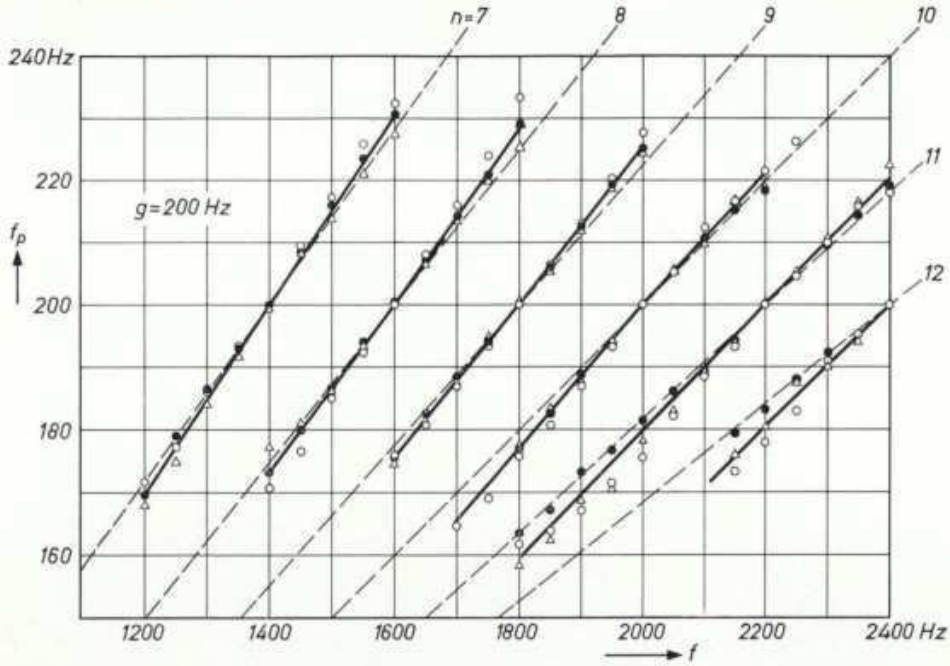


Fig. 9. Het veranderen van de toonhoogte f_p van een complex van drie componenten bij variërende centrale frequentie f kan, indien men zich daarop concentreert, nog enige tijd worden gevolgd voorbij de frequentie waarbij voor een argeloze luisteraar f_p een sprong maakt (vgl. fig. 6). Dit betekent dat de toonhoogte van zo'n complex niet ondubbelzinnig vastligt. In het geval waarop de grafiek betrekking heeft, kan men bij $f = 1800$ Hz aan het complex niet minder dan vier toonhoogten toekennen. (Volgens de hypothese omtrent het verloop van f_p met f (zie fig. 7) zou de verandering in f_p exact gelijk moeten zijn aan het n-de deel van die in f, en zouden de curven samenvallen met de streeplijnen. Zoals men ziet, is er een kleine systematische afwijking; een verklaring hiervoor is nog niet gevonden.)

De variatie van f_p met f bij equidistante verschuiving van een complex van drie sinustrillingen behoeft niet altijd te verlopen als geschetst is in fig. 6. Een proefpersoon die zich op het veranderen van de residutoonhoogte concentreert, kan de sprong in f_p uitstellen [8]). In *fig. 9* vindt men enige metingen hieromtrent in grafiek gebracht. Men ziet dat de frequentiegebieden waarvoor de diverse f_p-f-curven gelden, elkaar zover overlappen dat bij b.v. $f = 1800$ Hz aan f_p niet minder dan vier waarden kunnen worden toegekend. *De toonhoogte die het menselijk gehoor aan een bepaald geluid toekent, wordt dus niet in alle gevallen ondubbelzinnig door de fysische parameters van het geluid bepaald.* Men noemt dit de ambivalentie van toonhoogtegewaarwording.

Luistert men daarentegen argeloos naar een dergelijk complex dat equidistant verschoven wordt van b.v. $f = 10g$ tot $f = 11g$, en vergelijkt men de waargenomen toonhoogte niet geregeld met die van een referentietoon, dan maakt men de sprong, blijkens onze ervaring, onbewust. Men meent een toon te horen die voortdurend stijgt maar constateert na afloop van het experiment tot zijn verbazing dat f_p evenzeer gelijk is aan g als aan het begin.

Zoals men uit fig. 9 kan aflezen, is de verandering in f_p niet precies gelijk aan het n-de deel van die in f. De grootte van de afwijking blijkt af te hangen van de luidheid. Onderzoek omtrent de oorzaak van dit effect is nog gaande.

De toonhoogte van kortdurende geluiden

Tot nu toe hebben we alleen gesproken over geluiden die relatief lang aangehouden worden. Thans willen we iets zeggen over kortdurende geluiden.

Na de bovenstaande uiteenzettingen over de residutoonhoogte van een complex van drie componenten en de met f evenredige variatie daarvan bij equidistante verschuiving, ligt de vraag voor de hand hoeveel perioden $1/g$ het gehoor nodig heeft om de residutoonhoogte vast te stellen. Onderzoek in dit instituut heeft geleerd dat dit er voor residutoonhoogten met f_p tussen 200 en 475 Hz steeds vier zijn. Bij een g-waarde van b.v. 200 Hz is dus blijkbaar het gehoor in staat om in 20 ms de toonhoogte vrij nauwkeurig vast te stellen.

Is bij het toekennen van een toonhoogte aan een residutoon het aantal perioden $1/g$ de bepalende factor, bij sinustonen is het de tijdsduur van de stoot. Een relatief lange stoot waardeert men duidelijk als toon. Wordt de duur verkort, dan verandert er aanvankelijk nauwelijks iets, maar bij een bepaalde kritieke waarde begint het geluid van karakter te veranderen: het gaat geleidelijk over van een toon Va
in een tik.

Metingen omtrent de toonhoogtegewaarwording van kort durende stoten kan men het beste doen door de proefpersoon twee even lange stoten van verschillende frequentie kort na elkaar aan te bieden. Men begint met een zeer klein frequentieverschil en laat dit geleidelijk groter worden. Men gaat daarbij na bij welk frequentieverschil de proefpersoon de beide „tonen" juist niet meer als even hoog be- Vb
schouwt.

De resultaten van een dergelijk in dit instituut uitgevoerd onderzoek vindt men samengevat in *fig. 10*. Het betrof hier stoten van een sinustrilling van 1000 Hz waarvan het begin en einde ieder samenvielen met een nuldoorgang van de trilling [12]). De grootheid Δf is het zojuist genoemde kritische frequentieverschil en Δt is de duur van de stoot.

[12]) B. Lopes Cardozo, Frequency discrimination of the human ear, Proc. 4th int. Congr. Acoust. I, Kopenhagen 1962, ter perse.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

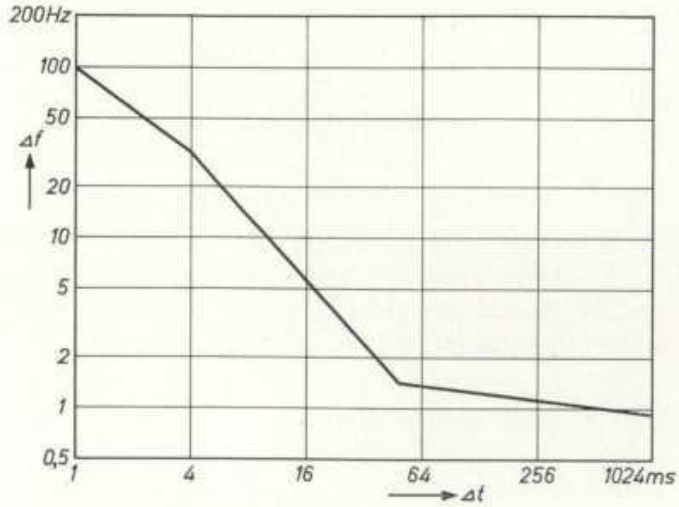


Fig. 10. De duidelijkheid waarmee men een korte sinusstoot als toon ervaart, hangt af van de duur Δt van de stoot. Laat men Δt afnemen, dan wordt de luisteraar steeds onzekerder omtrent de aan het geluid toe te kennen toonhoogte. De grafiek toont het resultaat van metingen waarbij de proefpersoon steeds twee toonstoten (1000 Hz) ter lengte Δt werden aangeboden, met een klein frequentieverschil dat langzaam werd opgevoerd. Langs de ordinaat is uitgezet het frequentieverschil Δf waarbij de proefpersoon de tonen juist niet meer als even hoog waardeerde.

Zoals men ziet, is Δf nagenoeg constant en zeer klein ($\approx$ 1 Hz) zolang Δt langer is dan 50 ms. Verkort men Δt nog verder, dan neemt Δf toe, maar niet bijzonder sterk. Bij $\Delta t = 2$ ms is Δf nog niet groter dan 50 Hz, d.i. slechts $2\frac{1}{2}\%$ van f. Het menselijk gehoor is dus bij sinustrillingen — trillingen waarbij de periodiciteit identiek is met de reciproke frequentie — blijkbaar in staat een frequentieverschil van enkele procenten in enkele milliseconden vast te stellen. Men kan de grafiek van fig. 10 voor $\Delta t < 50$ ms met goede benadering beschrijven door de vergelijking $\Delta f \Delta t =$ constant. De constante, die van persoon tot persoon wat verschilt, is van de orde van grootte van 0,1.

Tot slot nog enkele opmerkingen over grilliger klankcomplexen dan de besproken groepen van drie trillingen en over geluiden die na de inzet snel van karakter veranderen.

Wat betreft de stationaire harmonische complexen met méér dan drie componenten, kan gezegd worden dat de eigenschappen daarvan dikwijls kunnen worden afgeleid uit de vermelde eigenschappen van de besproken complexen van drie. Complexen waarvan de componenten niet equidistant zijn, zijn nog niet onderzocht.

Ook voor geluiden die na de inzet snel veranderen, vertoont onze kennis nog leemten. De grote betekenis van het inzeteffect ten spijt — een pianotoon die van zijn inzet is ontdaan, is als zodanig nauwelijks herkenbaar [13]) —, is dit effect voor muziekinstrumenten nog niet uitvoerig bestudeerd. Wel wordt intensief onderzoek verricht aan de menselijke stem. Dit onderzoek moet echter in hoofdzaak gerekend worden tot de fonetiek.

Voorbeelden van de experimenten die in dit artikel met Romeinse cijfers (I t/m V) in de marge zijn aangeduid, zijn vastgelegd op een door het I.P.O. gemaakte grammofoonplaat [14]). Met behulp van deze plaat kan de lezer de besproken eigenschappen van de toonhoogtegewaarwording zelf waarnemen.

[13]) Vgl. b.v. de geluidsvoorbeelden bij het artikel: H. Badings en J. W. de Bruyn, Elektronische muziek, Philips techn. T. **19**, 269-279, 1957.

[14]) Men kan deze grammofoonplaat (die behalve de geluidsvoorbeelden toelichtingen in de Engelse taal bevat) gratis verkrijgen door inzending van de bon die zich aan het inlegvel met korte samenvattingen in dit nummer bevindt.

Samenvatting. Het welbekende verband tussen frequentie en toonhoogte van sinustonen geldt in vele gevallen niet voor complexe geluiden: een groep van drie (of meer) naburige harmonischen (frequenties $f-g$, f en $f+g$) heeft in een groot gebied van f,g-combinaties dezelfde toonhoogte als de grondtoon (residu-effect). Uit maskeringsproeven met ruis en uit het feit dat de toonhoogte verandert als men de drie componenten bij constante g in frequentie verschuift, blijkt dat de residutoon niet in het mechanische deel van het oor ontstaat maar van neurale oorsprong is. Uit de laatstgenoemde proeven blijkt verder dat de toonhoogte niet precies correspondeert met de periodiciteit van de omhullende van het signaal (frequentie g) maar wordt afgeleid uit de fijnstructuur ervan. Bij een korte stoot wordt de residutoonhoogte reeds gehoord als de stoot vier perioden $1/g$ lang is. Bij een sinusstoot is de duur de bepalende grootheid.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

HET FONETISCH ONDERZOEK

door A. COHEN *). 534.4

De fonetiek houdt zich bezig met de bestudering van spraakklanken; sinds lang inclusief de voortbrenging daarvan, en sinds kort ook inclusief de perceptie. Men kan zeggen: de fonetiek bestudeert de communicatie van mens tot mens door middel van spraak, waarbij dan de taal welke gesproken wordt, niet als object van studie, maar als gegeven beschouwd wordt [1]). Men kan de fonetiek niet uitsluitend opvatten als onderdeel van de taalwetenschap, van de biologie, of van de natuurkunde; al deze wetenschappen dragen het hunne bij. Gaan we nl. de gehele „communicatieketen" langs, dan ontmoeten we achtereenvolgens 1) het menselijke stemorgaan (studieobject van de anatomie en de fysiologie), 2) de wijze waarop dit orgaan de spraakklanken produceert (articulatieleer), 3) de voortgebrachte klanken, beschouwd als trilling van de lucht (akoestiek), 4) het oor en de tot het gehoororgaan behorende neurale elementen (anatomie en fysiologie). Dat deze laatste schakel van de keten — de perceptie — thans in het fonetisch onderzoek betrokken wordt, is juist te danken aan de bewuste toepassing van de concepties van de nog jonge communicatieleer.

Bij het fonetisch onderzoek dat sinds 1959 in het I.P.O. wordt verricht, is als centraal probleem gesteld de vraag: *Welke fysische kenmerken van de spraakklanken zijn essentieel voor de herkenning van de daarin vervatte taalinhoud?* Evenals de tekens van vele andere coderingssystemen, zoals b.v. onze letters, bevatten de spraakklanken nl. een vrij grote hoeveelheid voor de herkenning niet absoluut noodzakelijke informatie. Dit blijkt reeds uit het in het oog springende feit dat men op het gehoor niet alleen de inhoud van het gesprokene kan opnemen, maar ook conclusies kan trekken omtrent de identiteit van de spreker en evtl. zijn gemoedstoestand. Het zal duidelijk zijn dat men het genoemde probleem, welke kenmerken essentieel zijn voor het herkennen van de taalinhoud, niet kan oplossen langs de weg van de akoestische analyse alleen, maar dat bij dit onderzoek ook het percipiërende deel van de keten — de vierde schakel — moet functioneren. Anders gezegd: als laatste en belangrijkste deel van de meetapparatuur fungeert de luisterende mens zelf.

Globaal gesproken, worden er bij dit onderzoek twee stappen gedaan. Eerst wordt een spraakklank in zijn onderdelen ontleed en wordt er nagegaan welke onderdelen, of eigenschappen daarvan, essentieel zijn voor de herkenning. Vervolgens worden de resultaten van deze analyse gecontroleerd door op basis hiervan, geheel langs instrumentele weg, spraak te synthetiseren. De wijze waarop dit alles geschiedt, zal hieronder worden besproken.

Het akoestisch onderzoek van de spraakklanken is in zijn ontwikkeling lange tijd enigszins geremd doordat de onderzoekers slechts een beperkte apparatuur ten dienste stond. Een eerste verbetering trad in de jaren '30 in met de komst van de katodestraaloscilloscoop; hiermee kon men beter dan voorheen nagaan hoe de trillingsamplitude varieert met de tijd. In de jaren '40 voegde zich daarbij de geluidsspectrograaf, die het geluid van ogenblik tot ogenblik spectraal analyseert en het mogelijk maakt het verloop van het spectrum gedurende enige tijd continu te registreren [2]).

Wat het instrumentele aspect van het fonetisch onderzoek betreft, wordt er in het I.P.O. van uitgegaan dat, evenals bij natuurwetenschappelijk onderzoek, de apparatuur ontworpen moet worden met het oog op de eisen die het onderzoek stelt en niet omgekeerd. Weliswaar wordt er ook in dit instituut gebruik gemaakt van de genoemde, inmiddels als conventioneel te beschouwen, apparatuur, maar voor het uitvoeren van het hierboven geschetste onderzoek heeft deze slechts een beperkt belang; het belangrijkste hulpmiddel daarbij zijn enige nieuw ontworpen apparaten, die in dit artikel nog beschreven zullen worden. Het gebruik van deze nieuwe apparatuur heeft o.m. mogelijk gemaakt een antwoord te vinden op de aloude vraag of de spraak, fonetisch beschouwd, kan worden onderverdeeld in duidelijk in de tijd gescheiden segmenten of niet.

We willen in dit artikel nu achtereenvolgens beschrijven hoe we de spraakklanken analyseren en hoe de genoemde synthese van kunstmatige spraak

*) Instituut voor Perceptie Onderzoek, Eindhoven.

[1]) Men vindt de fonetiek behandeld in diverse hand- en leerboeken, zoals b.v. L. Kaiser, Manual of phonetics, North-Holland Publ. Cy. Amsterdam 1957. De tak van wetenschap die zich bezighoudt met de vraag hoe men zich een bepaalde taal (of dialect) opgebouwd kan denken uit een beperkt aantal woordonderscheidende klankvormen (de zg. fonemen), vormt een onderdeel van de taalwetenschap en draagt de naam fonologie. Daar slechts de onderscheidbaarheid van de woorden als maatstaf geldt, maakt men in het fonologische systeem van het Nederlands b.v. geen onderscheid tussen de *ee* van mees en die van meer. Voor de fonetiek zijn dit verschillende klanken.

[2]) Men vindt dit instrument uitvoerig beschreven in R. K. Potter, J. A. Kopp en H. C. Green, Visible speech, Van Nostrand, New York 1947.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

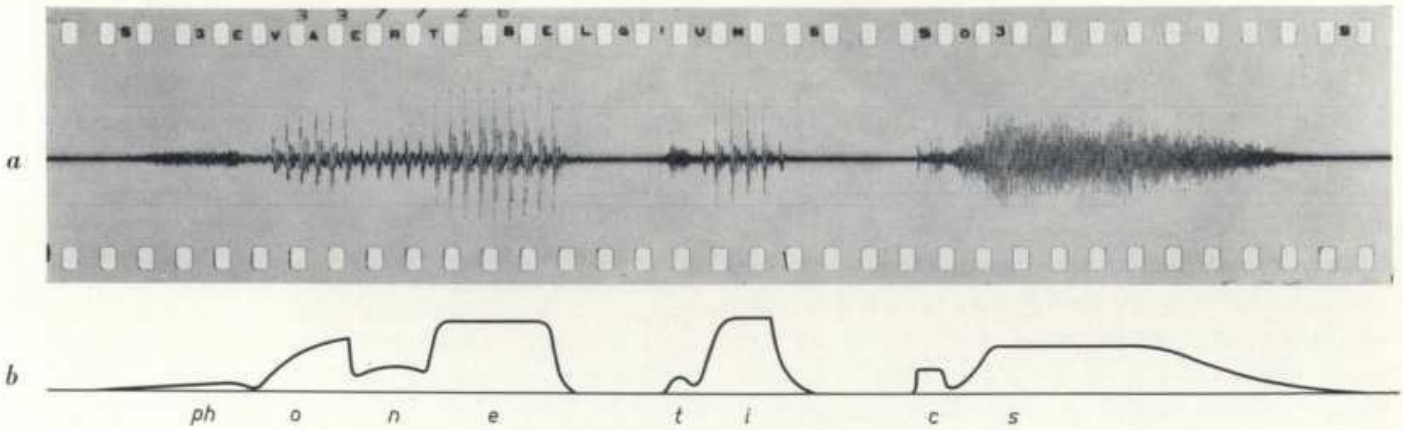


Fig. 1. *a*) Oscillogram van het Engelse woord phonetics. Opgenomen op een continu bewegende film terwijl de tijdasgenerator van de oscilloscoop was uitgeschakeld. *b*) De omhullende hiervan, die het amplitudeverloop weergeeft.

plaatsvindt. We besluiten met een enkele opmerking over praktische toepassing van de volgens onze methode van onderzoek verkregen resultaten.

Spraakanalyse

Alvorens onze methode van spraakanalyse en de daartoe dienende apparatuur te beschrijven, wijden we een enkel woord aan de conventionele apparatuur en de daarmee te verkrijgen gegevens. Zoals gezegd, kan men met de katodestraaloscilloscoop het amplitudeverloop van de spraakklanken volgen. De periode van de tijdas moet daartoe zo lang gekozen worden dat het gehele te bestuderen woord(-deel) binnen één periode kan worden uitgesproken. Een voorbeeld vindt men in *fig. 1a*. In deze figuur ziet men het trillingspatroon dat op het scherm verschijnt bij het uitspreken van het Engelse woord phonetics. In fig. 1*b* is de omhullende van dit patroon — het amplitudeverloop dus — getekend.

Voorbeelden van registraties van het Engelse woord fine, verkregen met de geluidsspectrograaf [2]), vindt men in *fig. 2*. Het instrument kan worden ingesteld op twee waarden van het scheidend vermogen (resp. ca. 50 Hz en 300 Hz). In fig. 2*a*, die is opgenomen met het grote scheidend vermogen, kan men goed zien dat het spectrum van de klinker een lijnenspectrum is, dat van de *f* een ruisspectrum. De spectrumlijnen van klinkers zijn

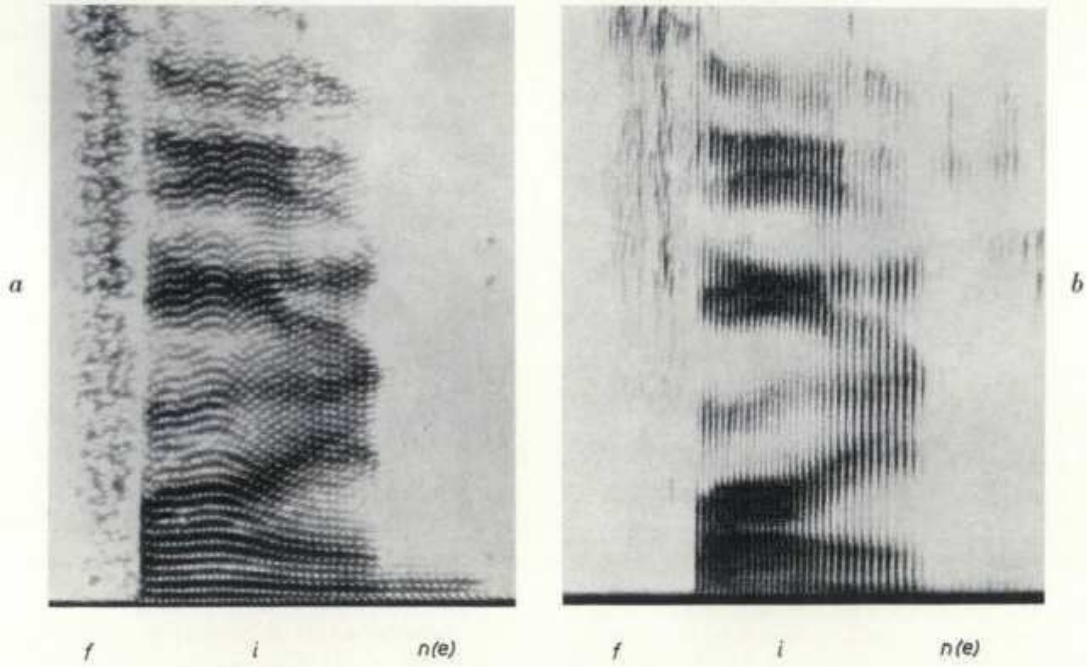


Fig. 2. Spectrogrammen van het Engelse woord fine. *a*) Opgenomen met een groot scheidend vermogen (ca. 50 Hz), *b*) met een gering scheidend vermogen (ca. 300 Hz). In (*a*) ziet men duidelijk dat de *f* een ruisspectrum heeft, en de andere klanken een lijnenspectrum. De zwarting is sterker naarmate een spectrumlijn sterker is. Vooral in (*b*) komt goed uit dat er frequentiegebieden zijn waarbinnen de lijnen sterk zijn (de zg. formantgebieden), gescheiden door gebieden waar ze zwak zijn.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

alle harmonischen van een grondtoon, die in het spectrum soms niet of slechts zwak aanwezig is. De spectrumlijnen zijn sterker gezwart naarmate de desbetreffende harmonische sterker is. In fig. 2*b*, die is opgenomen met het geringe scheidend vermogen, vloeien de spectrumlijnen min of meer ineen. Daardoor kan men goed zien dat er frequentiegebieden zijn waarbinnen de spectrumlijnen een relatief grote intensiteit hebben (de zg. formantgebieden), gescheiden door gebieden waar ze zwak zijn. De typische klank van een klinker wordt bepaald door de ligging van deze formantgebieden. Deze ligging wordt op zijn beurt bepaald door de tongstand — deze bepaalt in hoofdzaak de vorm van mond- en keelholte — en is vrijwel onafhankelijk van de grondtoon. Men kan dit nauwkeurig nagaan met behulp van de eveneens tot het I.P.O.-instrumentarium behorende geluidsspectroscoop die eerder in dit tijdschrift beschreven is [3]).

Met het eerste der in het I.P.O. ontwikkelde instrumenten, de zg. poortschakeling, kan de tijdstructuur van een op geluidsband geregistreerd woord worden geanalyseerd. In *fig. 3* is schematisch aangegeven hoe dit in zijn werk gaat. Het woord wordt ten gehore gebracht door middel van een weergeefkop die slechts een beperkt tijdinterval ingeschakeld is, terwijl tevens het begin van dit interval telkens ca. 10 ms verschuift ten opzichte van de tijdstippen waarop het woord de weergeefkop passeert. Aanvankelijk hoort men niets, dan de eerste 10 ms van het woord, dan de eerste 20 ms, enz. Als de poort het woord bijna gepasseerd is, hoort men alleen nog de laatste 10 ms van de laatste klank.

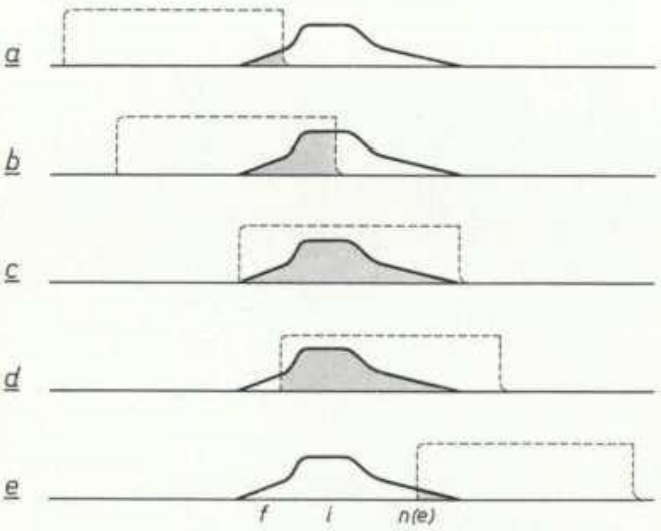


Fig. 3. Schematische voorstelling van een fonetische analyse van het Engelse woord fine met behulp van een zg. poortschakeling. In de figuur wordt het woord voorgesteld door zijn omhullende; de streeplijn stelt de doorlatingskromme van de weergeefapparatuur voor. Het tijdinterval gedurende hetwelk de „poort" open is, verschuift in stappen van ca. 10 ms ten opzichte van het woord, zodat aanvankelijk een steeds langer stuk daarvan hoorbaar wordt (*a* t/m *c*). Daarna wordt het begin afgekapt (*d*) en ten slotte hoort men alleen het einde van het woord (*e*).

[3]) D. J. H. Admiraal, Een geluidsspectroscoop met elektronische aftasting, Philips techn. T. **21**, 360-367, 1959.

Er bestaan van de poortschakeling thans drie verschillende uitvoeringen. Bij de eerste wordt er gewerkt met een stukje geluidsband dat tot een lus gesloten is en voortdurend rondloopt. De as waarop zich de rol bevindt die de band voortbeweegt, is via een tandwielsysteem gekoppeld met een tweede as. De omwentelingstijd van laatstgenoemde as is een tijd Δt (ca. 10 ms) langer dan de omloopstijd van het bandje. Op de as bevindt zich een nok die een contact bedient dat een monostabiele wipschakeling (univibrator) in werking stelt. Laatstgenoemde schakelt de weergeefkop in en bepaalt hoe lang deze ingeschakeld blijft. De poort gaat op deze wijze inderdaad ten opzichte van het ogenblik waarop het woord passeert, steeds iets later open. Voorwaarde voor de goede werking is dat de band niet slipt ten opzichte van de rol die hem in beweging brengt. Nadelen van deze methode zijn de gevoeligheid voor rekken van de band en de onmogelijkheid om Δt snel te veranderen. Een voordeel is de grote eenvoud.

Bij de tweede uitvoeringsvorm wordt gewerkt met een gewone band. Deze staat stil, maar ligt langs ca. twee derde van de omtrek van een roterende schijf waarin de weergeefkop is aangebracht. Op de as die deze schijf draagt, bevindt zich weer een contact, dat op dezelfde wijze als in het vorige geval de weergeefkop inschakelt. Men kan de poort hier ten opzichte van het woord verschuiven door de band een eindje op te schuiven. De spoel waarop zich de band bevindt, wordt daartoe door middel van een speciale mechaniek over een constante kleine hoek gedraaid. Deze mechaniek wordt met de hand bediend. Aan deze methode kleven niet de nadelen van de vorige. Bovendien behoeft men de band waarop de te onderzoeken woorden geregistreerd zijn, niet te verknippen, wat het bewaren vergemakkelijkt. Ook kan men hier met hetzelfde gemak de poort ten opzichte van het woord achteruit laten lopen.

De derde methode werkt niet deels mechanisch doch geheel elektronisch. Men gebruikt hier weer een lusvormige band, maar nu een met twee sporen, die tegelijkertijd dienst doen. Op het ene spoor bevindt zich het te onderzoeken woord, het andere bevat equidistante tijdmerken die de tijd verdelen in eenheden van 0,2 à 0,5 ms. Na iedere omloop van de band gaat de poort een instelbaar aantal tijdeenheden later open.

Een van de meest verrassende resultaten die het onderzoek met de poortschakeling tot dusver heeft opgeleverd, is dat de klinkers van Nederlandse woorden als zijn, fijn, feit, zuid, goud, enz. blijken te bestaan uit twee duidelijk gescheiden segmenten, ieder met een eigen klank. Hetzelfde geldt voor soortgelijke klinkers in de tot nu toe geanalyseerde Engelse woorden zoals b.v. fine. Verder is o.m. gebleken dat medeklinkers als *f*, *z*, en *g*, wanneer men slechts een stukje van 25 ms ervan doorlaat, klinken als resp. *p*, *d* en *k* [4]).

[4]) Een uitvoeriger beschrijving en classificatie van de resultaten vindt men in A. Cohen en J. 't Hart, Segmentation of the speech continuum, Proc. 4th int. Congr. Acoust. II, Kopenhagen 1962, ter perse.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Het verrassende van het eerstgenoemde resultaat is daarin gelegen dat men bij onderzoek van de articulatie nauwelijks enige aanwijzing in de richting van een duidelijke segmentatie vindt. Integendeel, de bestudering van de mondbeweging, o.m. door middel van röntgenfilms, leert dat de mondstanden bij het uitspreken van de desbetreffende klanken geleidelijk in elkaar overgaan. Ook in het oscillogram (vgl. fig. 3) valt hieromtrent niets te bespeuren. Men mag verwachten dat de beschreven analysemethode ook van nut zal zijn voor onderzoek betreffende de tijdens het spreken optredende toonhoogtevariatie.

Synthese van spraak; de IPOVOX

Ten einde de perceptieve waarde van de bij de analyse gevonden eigenschappen der spraakklanken nader te kunnen onderzoeken en de juistheid van de analyseresultaten te kunnen controleren, is een apparaat, de Ipovox, geconstrueerd waarmee spraak kan worden *gesynthetiseerd*. Globaal bestaat de Ipovox uit drie delen: het eerste deel bevat de bronnen voor enige continue grondgeluiden, het tweede een aantal schakelingen waarmee het mogelijk is voor ieder der gebruikte geluiden het gewenste amplitudeverloop te realiseren, de zg. functiepoortschakelingen (zie *fig. 4*), en het derde is een gecompliceerde programmaschakelaar, die ervoor zorgt dat ieder geluidsfragment met het juiste amplitudeverloop op het juiste moment ten gehore wordt gebracht. De continue grondgeluiden bestaan uit ruis voor de diverse plof- en wrijfklanken (*p*, *t*, *k* resp. *f*, *s* en *g*) en uit tonen met een harmonisch spectrum voor de klinkers en de klinkerachtige medeklinkers (b.v. *l* en *m*). Beide soorten geluiden worden verkregen uit resp. één ruisbron en één trillingsbron, en wel door toepassing van geschikte filters. De trillingsbron is een generator van periodieke zeer smalle impulsen. Het spectrum ervan bevat dus een zeer groot aantal harmonischen, waarvan men naar believen bepaalde groepen kan gebruiken. In *fig. 5* vindt men schematisch aangegeven hoe een woord — i.c. het Engelse woord phonetics — gesynthetiseerd wordt.

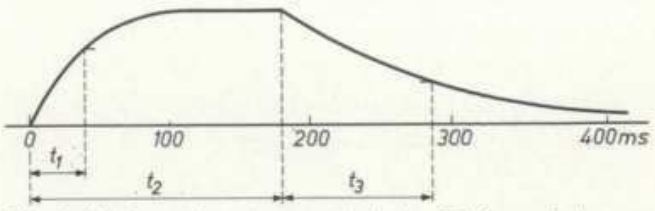


Fig. 4. Bij de synthese van spraak in het I.P.O. wordt het amplitudeverloop van ieder geluidssegment afzonderlijk geregeld met een zg. functiepoortschakeling. Dit is een bijzonder soort van monostabiele wipschakeling, die het mogelijk maakt van het doorlaatverloop behalve de duur (t_2) de karakteristieke tijden van ieder der flanken (t_1 en t_3) afzonderlijk in te stellen.

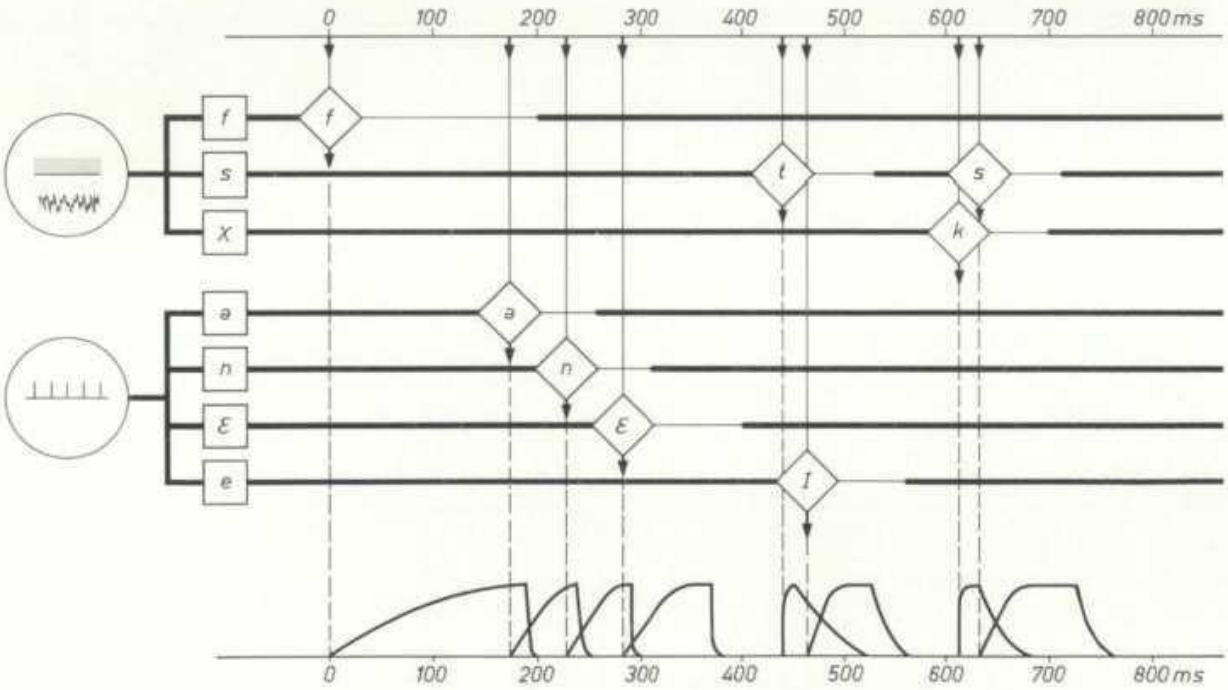


Fig. 5. Schematische voorstelling van de synthese van het Engelse woord phonetics. De klanken *f*, *s*, *t* en *k* worden verkregen door filteren van het spectrum van één enkele ruisbron; de andere door middel van een generator van periodieke zeer smalle impulsen, uit het spectrum waarvan steeds twee geschikt gekozen gebieden worden doorgelaten. Met behulp van functiepoortschakelingen (vgl. fig. 4) wordt aan ieder geluid het vereiste amplitudeverloop gegeven. Een programmaschakeling zorgt ervoor dat de geluiden op het juiste ogenblik ten gehore worden gebracht. Men zal opmerken dat de *t* en de *s* gemaakt worden met hetzelfde ruisspectrum en alleen verschillen in amplitudeverloop. Hetzelfde geldt voor de *i* (fonetisch geschreven *I*), die hetzelfde spectrum heeft als een *e* [5]).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De spectrogrammen zowel van de gesproken als van de kunstmatig voortgebrachte versie van dit woord vindt men in *fig. 6*. Men kan uit deze spectrogrammen aflezen dat bij de synthetische spraak de klinkers gerealiseerd zijn met behulp van slechts twee formantgebieden, terwijl de natuurlijke klinkers er meestal vier of meer hebben. Gebleken is dat deze vereenvoudiging de herkenbaarheid nauwelijks vermindert. Verder zijn de spectra van de *t* en de *s* identiek; het hangt hier geheel van de omhullende af — instelling van t_1, t_2 en t_3, zie fig. 4; vooral de inzet is belangrijk — welke van beide men hoort. In het spectrogram van het gesproken woord ten slotte ziet men tijdens de klank *I*, en in mindere mate ook tijdens *ɛ* [5]), het spectrum geleidelijk veranderen; bij de synthese gebeurt dit niet. Ook deze simplificatie blijkt de verstaanbaarheid niet te beinvloeden; het oor kan het verschil tussen de beide gevallen blijkbaar niet waarnemen.

Het blijkt mogelijk met deze methode van spraaksynthese de levende spraak zo nauwkeurig na te bootsen dat kleine verschillen in uitspraak als b.v. tussen het Nederlandse fonetiek, het Duitse Phonetik en het Franse phonétique duidelijk uitkomen.

De gunstigste ligging van de twee formantgebieden van de synthetische klinkers en klinkerachtige medeklinkers is gevonden door luisterproeven met Nederlandse luisteraars [6]). Het resultaat van dit onderzoek vindt men samengevat in *fig. 7*. In deze figuur is verticaal uitgezet de centrale frequentie van het laagste formantgebied (F_1) en horizontaal die van het tweede (F_2). Het geschaduwde gebied correspondeert volgens de proefpersonen met geluiden die niet door het menselijke spraakorgaan kunnen worden voortgebracht. De omlijnde delen van het witte gebied corresponderen met de daarin geschreven klanken. De grenzen ervan liggen uiteraard niet scherp vast en zelfs zijn overlappingen mogelijk; de ligging van de grens is nl. gebleken afhankelijk te zijn van de tijd gedurende welke de formantencombinatie ten gehore wordt gebracht.

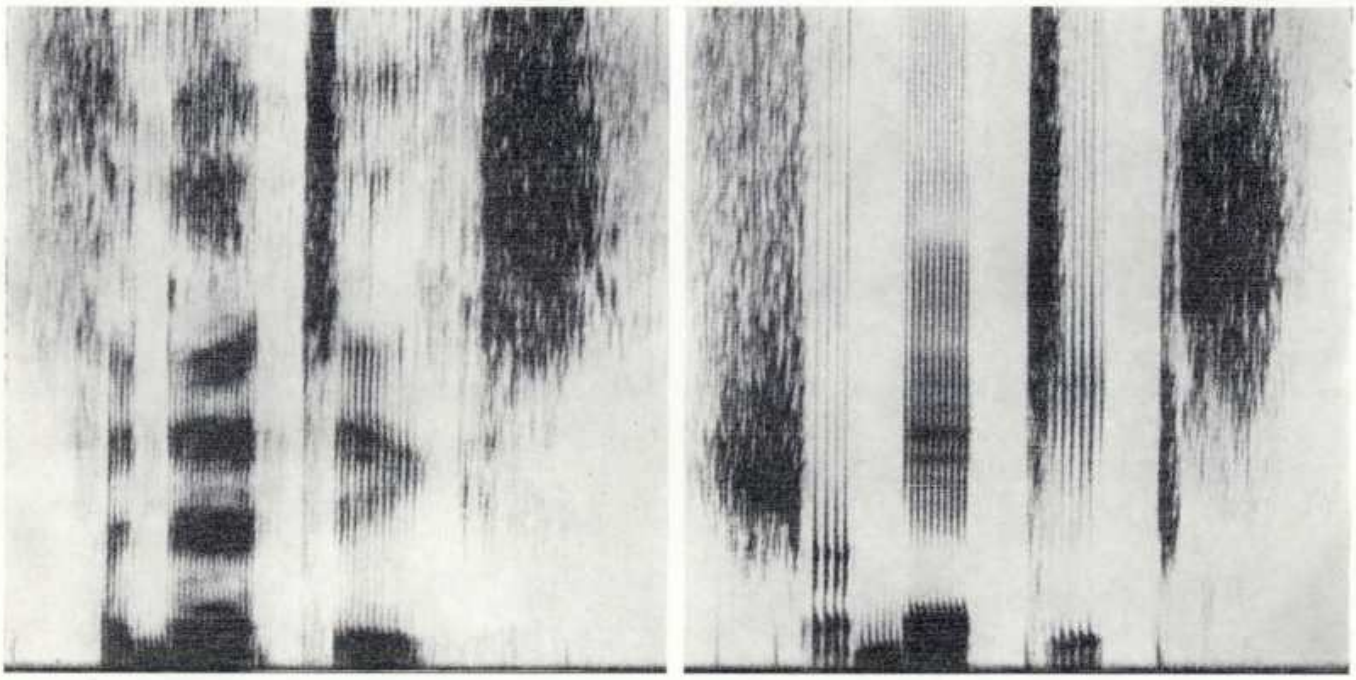


Fig. 6. Spectrogrammen van het Engelse woord phonetics. *a*) gesproken, *b*) synthetisch. Ondanks de bij de synthese toegepaste simplificatie van de spectra (vgl. fig. 5) en het ontbreken van continue overgangen, zoals b.v. tijdens de klank *I*, is het synthetische woord tot in details verstaanbaar.

Samenvattend kunnen we over de tot nu toe door ons verkregen resultaten zeggen dat hierdoor de grote perceptieve betekenis die aan de tijdstructuur der klankpatronen moet worden toegekend, onomstotelijk is aangetoond. Bij de analyse is, zoals vermeld werd, een duidelijke segmentatie van de spraakklanken gevonden. Bij de synthese is o.m. gebleken

[5]) De gebruikte fonetische tekens zijn die welke zijn vastgesteld door de International Phonetic Association te Londen (zie: The principles of the International Phonetic Association, Londen 1949) en die men aantreft in de lijst van tekens en afkortingen van vele woordenboeken.

[6]) A. Cohen en J. 't Hart, Speech communication seminar, Stockholm, 29 aug.-1 sept. 1962.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

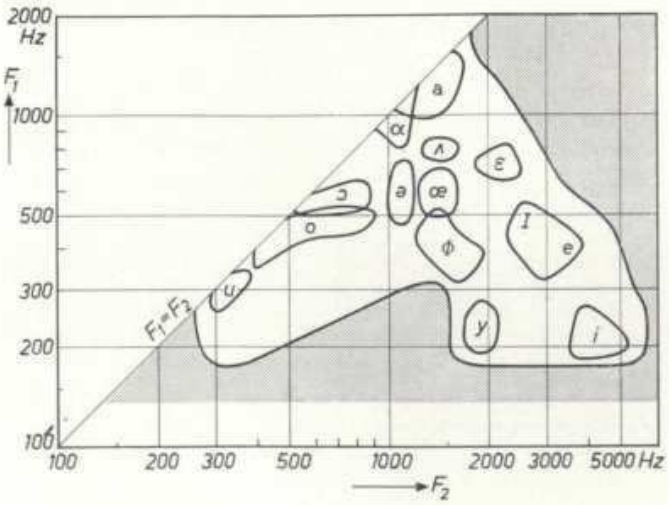


Fig. 7. Wil men, zoals in de Ipovox geschiedt, klinkers en klinkerachtige medeklinkers realiseren met behulp van slechts twee formantgebieden (frequentiegebieden F_1 en F_2), dan moet, blijkens luisterproeven, in een F_1 en F_2-diagram voor ieder der klanken het punt binnen de desbetreffende contour vallen.

dat uit perceptief oogpunt het juiste amplitudeverloop binnen de segmenten niet in belang onderdoet voor de spectrale samenstelling ervan: wanneer het amplitudeverloop juist is ingesteld (speciaal ten aanzien van de inzet en de uitloop), mag deze samenstelling in vrij sterke mate van de natuurlijke afwijken zonder dat dit de verstaanbaarheid ernstig benadeelt. Deze resultaten konden slechts bereikt worden dank zij de beschreven methodes van onderzoek en de grote flexibiliteit van de gebruikte apparatuur. Speciaal de mogelijkheid van snelle verandering van de diverse tijdsduren (functiepoort) bij de synthese is van grote waarde gebleken.

Voorbeelden van de beschreven proeven zijn door het I.P.O. vastgelegd op een grammofoonplaat. Met behulp van deze plaat kan men de diverse genoemde effecten zelf beluisteren en zich een oordeel vormen over de mate waarin de synthetische spraak de levende benadert [7]).

Het lijkt mogelijk dat de met dit type van onderzoek verkregen resultaten reeds op korte termijn toepassing vinden op het gebied van het spraakonderwijs; dit geldt zowel de logopedie — spraakonderwijs aan personen die behept zijn met articulatiemoeilijkheden — als het spraakonderwijs aan doofstommen. Op den duur lijken ook toepassingen op het gebied van het onderwijs in vreemde talen niet uitgesloten.

[7]) Deze plaat is dezelfde waarop zich de in het voorgaande artikel besproken geluidsdemonstraties betreffende de toonhoogtegewaarwording bevinden. De plaat wordt gratis toegezonden aan de lezers die de bon inzenden welke zich in dit nummer aan het inlegvel met korte samenvattingen bevindt.

Samenvatting. Bij het fonetisch onderzoek in het Instituut voor Perceptie Onderzoek te Eindhoven maakt men voor de analyse, behalve van de conventionele apparatuur (oscilloscoop, geluidsspectrograaf), gebruik van een speciaal ontwikkelde zg. poortschakeling. Deze bestaat uit een apparaat voor magnetische geluidsregistratie met hulpapparaten, dat van een op band geregistreerd woord telkens een langer deel ten gehore brengt (toeneming per keer ca. 10 ms) en ten slotte telkens een korter deel van het eind van het woord. Men heeft hiermee o.m. aangetoond dat de spraakklanken een duidelijke segmentatie vertonen, en dat medeklinkers als *f*, *z* en *g* overgaan in resp. *p*, *d* en *k* als men een stukje van slechts 25 ms ervan beluistert. De analyseresultaten worden gecontroleerd door synthese van spraak met een apparaat dat alle klanksegmenten van een woord op de juiste tijd en met het juiste amplitudeverloop ten gehore brengt. De klanken worden met behulp van filters verkregen uit slechts twee continue geluidsbronnen, nl. een ruisbron en een bron met een harmonisch spectrum. Bij goede keuze van het amplitudeverloop mag het spectrum van de geluiden vrij sterk van het natuurlijke afwijken zonder dat de verstaanbaarheid daaronder lijdt. De klanken *t* en *s* b.v. kunnen met hetzelfde ruisspectrum gerealiseerd worden door slechts het amplitudeverloop te veranderen. De resultaten kunnen wellicht toepassing vinden bij het spraakonderwijs.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

DE SPREEKMACHINE VAN WOLFGANG VON KEMPELEN

In de 18e eeuw begon het natuurwetenschappelijk onderzoek in de vorm waarin wij het kennen — gebaseerd dus op een wisselwerking tussen experiment en theorie — op gang te komen. Hiermee ging gepaard dat men oog kreeg voor de mens als „machine". Er werden talloze automaten geconstrueerd, die de een of andere menselijke functie konden verrichten, zoals muziekmaken, lopen, drinken, enz.

De spreekmachines die in 1791, in een destijds beroemd boek, werden beschreven door Wolfgang Ritter von Kempelen[1]), mag men ook tot deze categorie toestellen rekenen, met dien verstande echter dat ze niet gebaseerd waren op reeds lang bekende (b.v. mechanische) wetten, maar goeddeels op de resultaten van eigen onderzoek. Von Kempelen was dus een

[1]) Wolfgang von Kempelen, Mechanismus der menschlichen Sprache nebst der Beschreibung seiner sprechenden Maschine, Wenen 1791. Zie voor een beknopte beschrijving: H. Dudley en T. H. Tarnoczy, J. Acoust. Soc. Amer. **22**, 151, 1950.

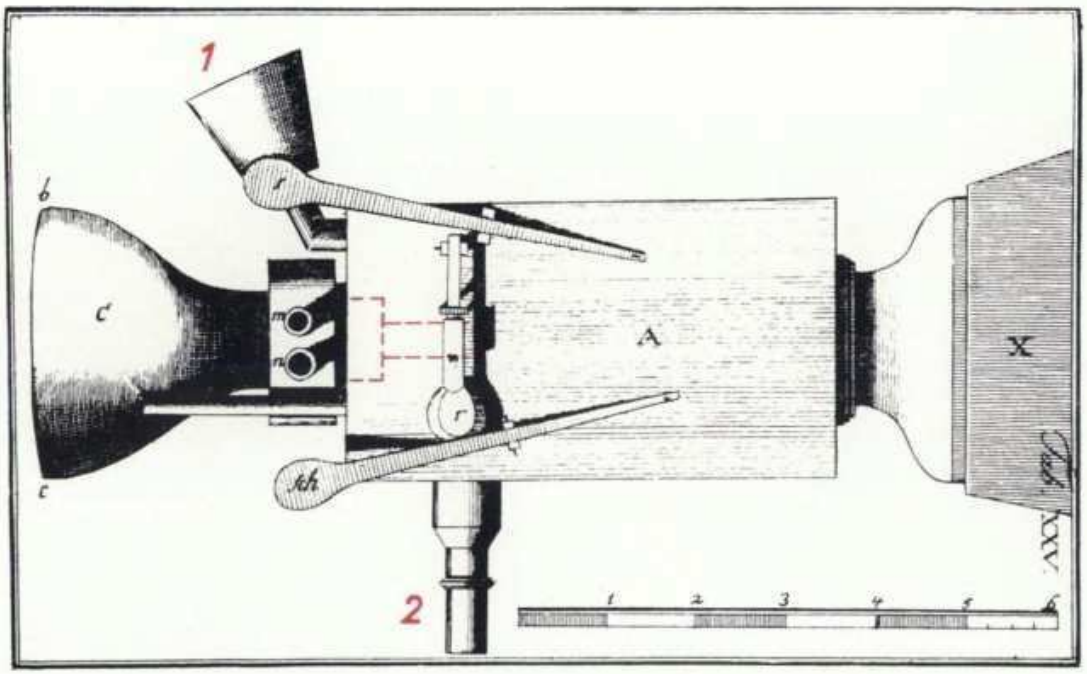


Fig. 1. De spreekmachine van Von Kempelen (bovenaanzicht), gereproduceerd uit zijn boek [1]), met enkele rood ingedrukte toevoegingen.

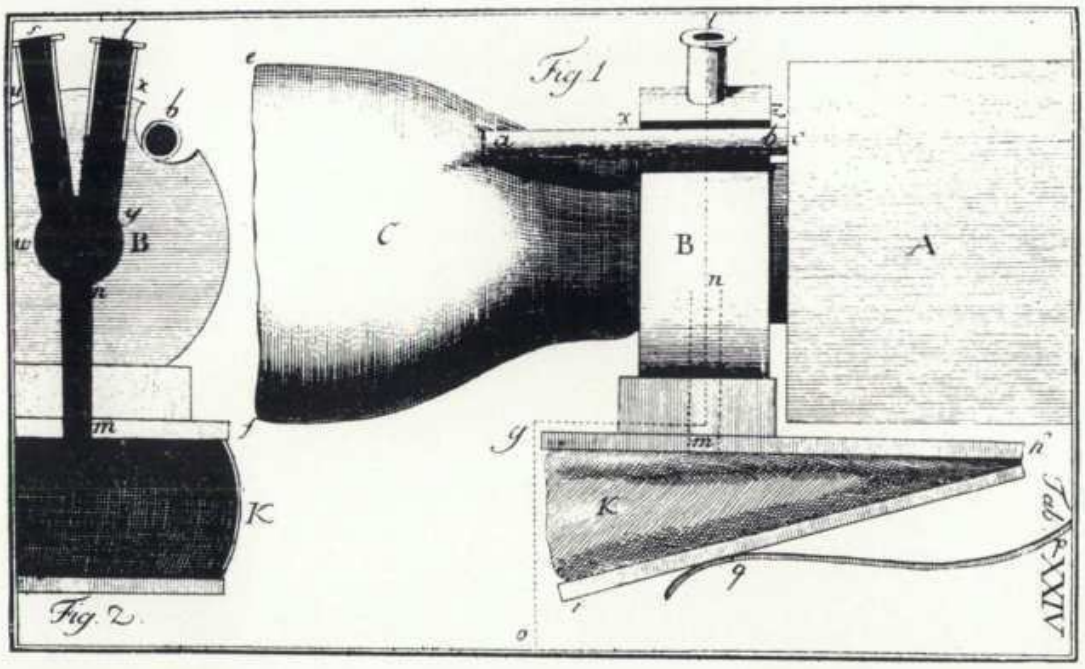


Fig. 2. Zijaanzicht en doorsnede over de „neusgaten".

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

serieuze voorloper op het gebied van het, in het voorafgaande artikel in dit nummer besproken, fonetische onderzoek, en het is de moeite waard even aandacht te besteden aan wat hij heeft gepresteerd. Sedert 1769 had Von Kempelen, die een hoge functie bekleedde aan het hof van Maria Theresia, zich voor zijn genoegen beziggehouden met de bestudering van het mechanisme van de spraak en met het construeren van de genoemde spreekmachines. Na twee minder geslaagde pogingen boekte hij succes met het in *fig. 1* afgebeelde exemplaar.

In hoofdzaak bestond deze machine uit een windlade *A* waarin lucht werd geblazen met de blaasbalg *X* en waarop aan de andere zijde een hals met klankbeker *C* was aangesloten. Vóór de hals bevond zich de primaire geluidsbron: een bromtong van een doedelzak (zie rode streeplijnen). Klinkers werden verkregen door *C* met de linkerhand op passende wijze gedeeltelijk af te sluiten (vgl. de werking van de menselijke mond- en keelholte). De R werd verkregen door met de hefboom *r* een draad tot zo dicht boven de trillende tong te laten zakken dat deze er juist tegenaan tikte. Voor de klanken S en SCH (Duits; Engels SH) waren er aparte geluidsbronnen („ruispijpen"; *1* en *2* in fig. 1), waaraan men lucht vanuit de windlade kon toevoeren door de gelijknamige hefbomen in te drukken. De plofklanken (P, T en K) werden verkregen door *C* met de hand te sluiten en, zodra de luchtdruk groot genoeg was, de hand snel weg te trekken. De vereiste druk kon slechts snel genoeg bereikt worden door de bromtong kort te sluiten via een pijpje (*ab* in *fig. 2*). Voor de P was nog de hulpblaasbalg *K* nodig. De klanken N en M werden eveneens verkregen door *C* te sluiten, waarbij dan resp. één of beide „neusgaten" *m* en *n* (in fig. 2: *s* en *l*) werden geopend. Met deze machine kon Von Kempelen alle Latijnse, Franse en Italiaanse woorden ten gehore brengen — ook gecompliceerde als b.v. „Constantinopolis" —, waarbij de afzonderlijke spraakklanken goed op elkaar aansloten. Klanken die de machine niet kon voortbrengen, waren NG en de Engelse klanken CH, J (van b.v. judge). ZH. TH (thin) en TH' (then).

ENIGE ONDERZOEKINGEN AAN HET VISUELE ZINTUIGSYSTEEM

door H. BOUMA *), H. W. HOREMAN *) en J. A. J. ROUFS *).

159.931

De buitenwereld enerzijds en de voorstelling die we ons met onze zintuigen ervan vormen anderzijds, kan men vergelijken met het ingangs- en het uitgangssignaal van een apparaat. Een apparaat verwerkt het ingangssignaal op een wijze die karakteristiek is voor dat apparaat: zo wordt ook de verwerking van de buitenwereld tot het zintuiglijke beeld hiervan bepaald door de eigenschappen van het desbetreffende zintuigsysteem. We leren dus de eigenschappen van b.v. het visuele zintuigsysteem kennen door het visuele beeld in zijn relatie tot de buitenwereld te bestuderen.

Het in het oog vallende licht kan niet alleen een visueel beeld doen ontstaan — een gebeuren waarbij ons bewustzijn betrokken is —, maar het kan ook aanleiding geven tot onbewuste lichamelijke reacties. Hiertoe behoren de pupilreflex, de accommodatie van de ooglens, bepaalde bewegingen van de oogbol, lichaamsbewegingen ter handhaving van het evenwicht, enz. Ook deze onbewuste reacties kunnen worden beschouwd als uitgangssignalen van het visuele systeem, en zij kunnen derhalve inzicht verschaffen in het visuele systeem.

Bij de bestudering van zowel de onbewuste reacties als het visuele beeld wordt in belangrijke mate gesteund op gegevens die langs andere weg worden verkregen, met name uit de anatomie, de (elektro-) fysiologie en de psychologie.

Voor zover men zich bij het onderzoek van het visuele systeem baseert op de onbewuste reacties, die in tegenstelling met het visuele beeld objectief waarneembaar zijn, kunnen zuiver fysische meetmethodes toegepast worden. In hetgeen volgt, zullen we als voorbeeld hiervan een in het I. P. O. verricht onderzoek aan de genoemde pupilreflex beschrijven.

Bij de bestudering van het visuele beeld zelf met het boven beschreven doel moet de proefpersoon het beeld op de een of andere wijze tot uitdrukking brengen. (Dit is een facet van elk zg. psychofysisch onderzoek, d.i. onderzoek aan psychische verschijnselen volgens methodes die aan de fysica ontleend zijn.) Als voorbeelden hiervan worden twee andere in het I.P.O. verrichte onderzoekingen beschreven: het eerste betreft de latentietijd van de visuele waarneming, het tweede de invloed van de omgevingsbelichting op de helderheidsindruk.

De pupilreflex

Het is een ieder wel uit eigen waarneming bekend dat de pupil zich vernauwt bij toeneming en zich verwijdt bij afneming van de lichtintensiteit. Minder bekend misschien is de reactie van de pupil bij het sluiten van één oog: in dat geval kan men de pupil van het geopende oog groter zien worden, alhoewel voor dit oog de lichtintensiteit dezelfde is gebleven.

Anatomische en (klinisch-)fysiologische onderzoekingen hebben nu geleid tot het volgende sterk ver-

*) Instituut voor Perceptie Onderzoek, Eindhoven.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

eenvoudigde schema van deze pupilreactie (*fig. 1*). Het licht dat op het netvlies valt, wordt door de receptoren *R* (de bekende staafjes en kegeltjes) geabsorbeerd, ten gevolge waarvan een signaal wordt uitgezonden naar een in de hersenstam gelegen

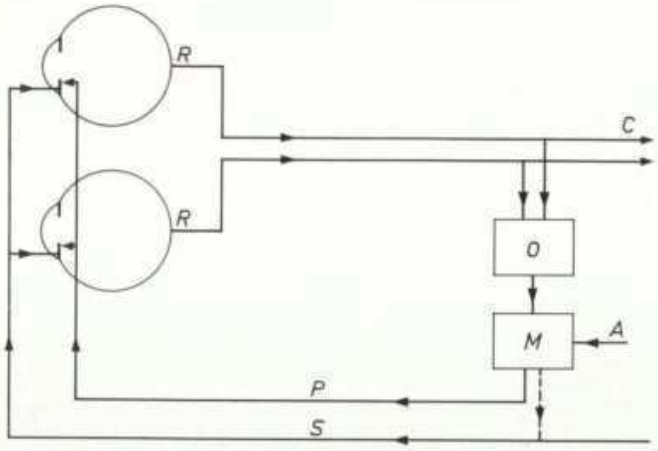


Fig. 1. Sterk vereenvoudigd schema van de pupilbesturing. *R* zijn de receptoren in het netvlies, die het door de pupil binnenvallende licht absorberen. *O* is het „ontvangcentrum" in de hersenstam waarin de signalen van beide ogen worden samengevoegd. *M* is het motorisch centrum, eveneens in de hersenstam, vanwaar signalen uitgaan naar de pupilspieren. Dit gebeurt via de parasympathische banen *P*, en mogelijk ook via de sympathische banen *S*.

Op deze regelkring kunnen behalve in het oog vallend licht ook nog andere invloeden werkzaam zijn (b.v. treedt bij schrik pupilverwijding op, bij slaap pupilvernauwing en bij fixeren van een nabij punt, als gevolg van de zg. „convergentiereflex", pupilvernauwing). Dergelijke invloeden grijpen in het algemeen aan op het motorisch centrum, zie pijl *A*. De banen die tot bewuste indrukken voeren, zijn door de pijlen *C* gesymboliseerd.

ontvangcentrum *O*. Hier worden de signalen van beide ogen op de een of andere wijze samengevoegd. Het signaal gaat dan via het motorisch centrum *M* en langs parasympathische zenuwbanen *P* (mogelijk ook langs sympathische banen *S*) naar de pupillen. Verandering in de lichtintensiteit geeft een verandering van signaal, die de pupilspieren zodanig doet reageren dat de aanvankelijke verandering ten dele kan worden gecompenseerd. Het pupilsysteem is dus te beschouwen als een regelkring. Door de samenvoeging van de signalen der beide ogen zijn de beide pupillen steeds even groot. Als één oog wordt gesloten, heeft dit hetzelfde effect als het verminderen van de lichtintensiteit en worden dus beide pupillen groter.

In het I. P. O. is onderzocht wat de invloed is van de golflengte van het licht op de pupilreflex. Het onderzoek is verricht met behulp van de entoptische methode, in een uitvoeringsvorm die naar ideeën van Schouten [1]) is ontwikkeld. We zullen deze methode thans nader toelichten.

Indien vlak voor het oog van een proefpersoon een puntvormige lichtbron wordt gebracht, maken de lichtstralen die vanuit dit punt het netvlies treffen, dat hij een cirkelvormige lichte plek te zien krijgt, waarvan de rand een projectie is van de pupilrand. Het verschijnsel kan men zelf waarnemen door een stuk karton, waarin met een speld een klein gaatje is geprikt, dicht bij het oog tegen het licht te houden. Indien in het karton twee gaatjes zitten, ziet de proefpersoon uiteraard twee projectiecirkels; deze kunnen afhankelijk van de afstand tussen de gaatjes los van elkaar staan of elkaar gedeeltelijk overlappen. Als de cirkels elkaar juist raken, is de afstand van de gaatjes gelijk aan de pupildiameter (zie *fig. 2*).

Voor het uitvoeren van de meting kan gebruik worden gemaakt van een pupillometer: een gezwart fotonegatief waarin een aantal goed door-

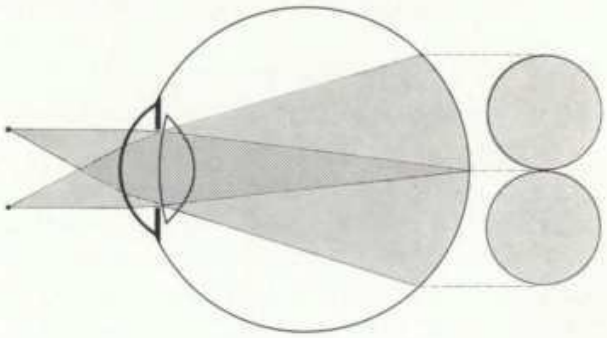


Fig. 2. Twee puntvormige lichtbronnen die vlak voor het oog zijn gebracht, werpen twee lichtbundels op het netvlies. De bundels zullen elkaar overlappen dan wel geheel gescheiden zijn, afhankelijk van de onderlinge afstand van de lichtbronnen, de pupildiameter en de accommodatie van het oog. Bij het *niet* geaccommodeerde oog komen evenwijdig opvallende stralen op het netvlies samen. De netvliesbeelden zullen elkaar dan juist raken als de afstand van de lichtbronnen gelijk is aan de pupildiameter. De grootte van de netvliesbeelden doet er, zoals men ziet, niets toe.

Doordat de breking van de lichtstralen in hoofdzaak aan het hoornvlies geschiedt en slechts voor een klein deel in de lens, is de gemeten pupildiameter ongeveer 10% groter dan de werkelijke diameter. De gemeten diameter is echter gelijk aan de effectief werkzame diameter die bepaalt hoeveel licht in het oog valt.

latende puntjes zijn aangebracht in paren met verschillende onderlinge afstand (*fig. 3*). Het licht waarvan men de invloed op de pupilgrootte wil bepalen, laat men op het ene oog vallen, het negatief houdt men voor het andere oog, en men zoekt het paar gaatjes waarbij de waargenomen cirkels elkaar raken. De kleine hoeveelheid licht die door de gaatjes in het oog valt, is te verwaarlozen ten opzichte van de lichthoeveelheid die op het andere oog valt en beïnvloedt de meting dus niet [2]).

[1]) J. F. Schouten, Visuele meting van adaptatie en van de wederzijdse beïnvloeding van netvlieselementen, diss. Utrecht 1937, blz. 17.

Voor belangstellenden zijn een aantal exemplaren van deze pupillometer beschikbaar. Men kan een exemplaar aanvragen door inzending van de bon die zich aan het inlegvel met korte samenvattingen in dit nummer bevindt.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

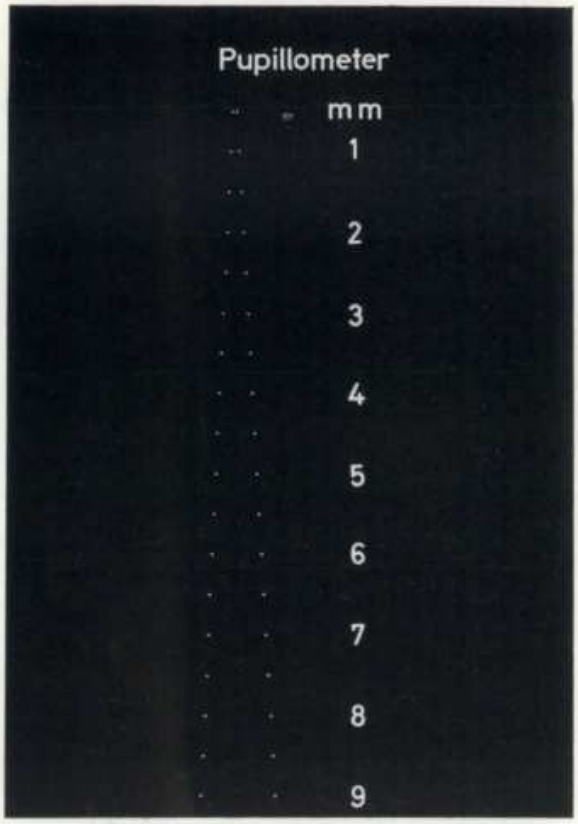


Fig. 3. Entoptische pupillometer, volgens het in fig. 2 geschetste principe. In een gezwart fotonegatief zijn paren stipjes uitgespaard, die het licht goed doorlaten. De onderlinge afstand is om het andere paar stipjes erbij vermeld [2]).

Men houdt de pupillometer zo tegen het licht dat één van de hierop voorkomende paren zich vlak voor een oog bevindt. Dit oog dient men ongeaccommodeerd te houden (b.v. door met het andere oog in de verte te kijken). Men neemt dan twee cirkelvormige lichte plekken waar (zie fig. 2). Zoekt men dat paar stipjes waarbij de twee cirkels die men ziet elkaar juist raken, dan is de pupildiameter (nagenoeg) gelijk aan de onderlinge afstand van dat paar stipjes.

De entoptische projectie kan behalve voor het meten van de pupildiameter ook gebruikt worden voor het waarnemen van de onregelmatigheden die in ieder oog voorkomen, zoals deeltjes op het hoornvlies, slieren in het glasachtige lichaam, enz. Met behulp van twee projecties vanuit verschillende punten is het zelfs mogelijk de onregelmatigheden ruimtelijk te lokaliseren.

Als men monochromatisch licht in het oog laat vallen en men varieert de golflengte, dan kan men met de bovenbeschreven methode constateren dat de pupil voor de ene monochromatische lichtsoort gevoeliger is dan voor de andere. De gevoeligheid P van de pupil is gedefinieerd als het omgekeerde van de energiestroom die een bepaalde diameter van de pupil (b.v. 5 mm) tot stand brengt. Dat de golflengte hier van invloed is, verklaart men uit het feit dat het mede van de golflengte afhangt hoeveel licht door de receptoren geabsorbeerd wordt. Een zelfde verklaring geldt voor het feit dat ook de helderheidsindruk afhangt van de golflengte (deze afhankelijkheid wordt gegeven door de bekende ooggevoeligheidskromme $V(\lambda)$).

De pupilgrootte bepaalt mede de verlichtingssterkte op het netvlies; aldus regelt de pupil tot op zekere hoogte de helderheidsindruk die een bepaald voorwerp ons geeft. Men beschouwt dit doorgaans als één van de twee belangrijkste werkingen van de pupil (de andere is de invloed op de gezichtsscherpte). In de lijn van deze gedachtegang ligt het voor de hand te veronderstellen dat de receptoren die verantwoordelijk zijn voor de pupilreactie, dezelfde zijn als de receptoren die de helderheidsindruk veroorzaken. Pupilgrootte en helderheidsindruk zouden dan een zelfde afhankelijkheid van de golflengte moeten vertonen.

Fig. 4 geeft het resultaat van een onderzoek waarbij onder dezelfde condities zowel de relatieve gevoeligheid P van de pupil als de relatieve ooggevoeligheid V als functie van de golflengte zijn bepaald [3]). Er blijkt uit dat de veronderstelde overeenstemming niet bestaat. De pupil is het meest gevoelig voor licht van een golflengte van 490 nm, terwijl voor de helderheidsindruk een golflengte van 550 nm het meest effectief is. Dit onverwachte verschil tussen de ooggevoeligheid en de pupilgevoeligheid als functie van de golflengte heeft reeds in 1937 de aandacht getrokken van Van Liempt [4]).

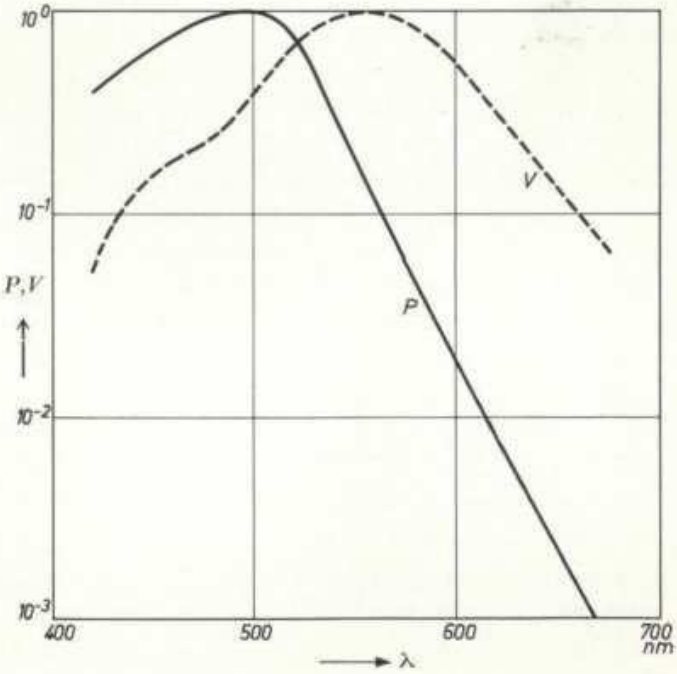


Fig. 4. De relatieve gevoeligheid P van de pupil en de relatieve ooggevoeligheid V als functie van de golflengte λ. Er is steeds in stationaire toestand gemeten. Het gezichtsveld was in beide gevallen 18°.

[3]) H. Bouma, Size of the static pupil as a function of wavelength and luminosity of the light incident on the human eye, Nature **193**, 690-691, 1962 (no. 4816).

[4]) J. A. M. van Liempt, De betekenis van de „Philora" natriumlamp voor de fotografie, Philips techn. T. **2**, 24-28, 1937.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Hij berichtte toen dat de pupil bij gelijke verlichtingssterkte op het oog in geel natriumlicht veel wijder was dan in blauw-wit kwiklicht, en hij baseerde hierop een advies om in de portretfotografie natriumlicht te gebruiken (omdat een grotere pupil om schoonheidsredenen de voorkeur verdient).

De gevonden golflengte-afhankelijkheid van de pupilgevoeligheid komt wèl min of meer overeen met de scotopische ooggevoeligheidskromme. Deze geeft de ooggevoeligheid in het gebied van de zg. schemerzin, d.w.z. bij zeer kleine lichtintensiteiten. De intensiteiten waarbij de pupilreflex is gemeten, zijn echter veel groter dan de intensiteiten waarbij de schemerzin werkt, zodat we alleen op grond van deze overeenkomst nog geen conclusies kunnen trekken over een gemeenschappelijke oorzaak.

De latentietijd van de visuele waarneming

Wanneer een lichtstraal het netvlies treft, ervaren we dit niet onmiddellijk: dit gebeurt ongeveer 100 ms later, wanneer de teweeggebrachte prikkel het „bewustwordingscentrum" heeft bereikt. We noemen deze tijd de latentietijd van de visuele waarneming. In het dagelijks leven is de beoordelingsachterstand die hierdoor ontstaat, gelukkig zo kort dat we er geen rekening mee hoeven te houden. Voor het waarnemen van voorwerpen met grote snelheid komt dit al iets anders te liggen: zo zien we een op ons toekomende sneltrein die een snelheid van 120 km per uur heeft, een meter of drie verder weg dan hij zich op dat moment werkelijk bevindt.

In het I. P. O. is onderzocht hoe de latentietijd afhangt van de intensiteit van het in het oog vallende licht [5]). Dat deze afhankelijkheid bestaat, kan op eenvoudige wijze aannemelijk worden gemaakt met behulp van het Pulfrich-effect: als men met beide ogen naar een in een vlak zwaaiende slinger kijkt en voor één van de ogen een lichtabsorberend filter houdt (b.v. met een doorlating van 20%, zoiets als een gewone zonnebril), dan ziet men dat de slinger uit zijn vlak komt en ongeveer een ellipskegel gaat beschrijven. De richting waarin deze kegel wordt doorlopen, is hierbij afhankelijk van het feit of het filter voor het rechter- dan wel het linkeroog gehouden wordt. *Fig. 5* verduidelijkt hoe dit verschijnsel vermoedelijk tot stand komt. Doordat de twee ogen een verschillende hoeveelheid licht ontvangen, is de latentietijd van de waarneming via ieder oog ook verschillend, en wel zo dat de zwakste prikkel de grootste latentietijd geeft. De lichtprikkels die via verschillende ogen gelijktijdig het bewustzijn bereiken, beantwoorden derhalve aan verschillende standen van de slinger. Dit wordt stereoscopisch geïnterpreteerd, waardoor de slinger een stand schijnt in te nemen buiten het vlak waarin hij zich in werkelijkheid bevindt.

Is men eenmaal attent op dit Pulfrich-effect, dat kan men het ook zonder hulp van een filter waarnemen door een oog gedeeltelijk te sluiten, waardoor het eveneens minder licht ontvangt. Uit de schijnbare uitwijking van de slinger bij het Pulfrich-effect kan in principe bepaald worden hoe de latentietijd afhangt van de lichtintensiteit. Storende invloeden maken deze methode in de praktijk echter ongeschikt.

We zouden de meting kunnen uitvoeren door een lichtflits voor het oog van een proefpersoon te ontsteken en hem te laten melden wanneer hij deze flits ziet. Hierbij moet echter ook de tijd nodig voor het melden in aanmerking worden genomen: de

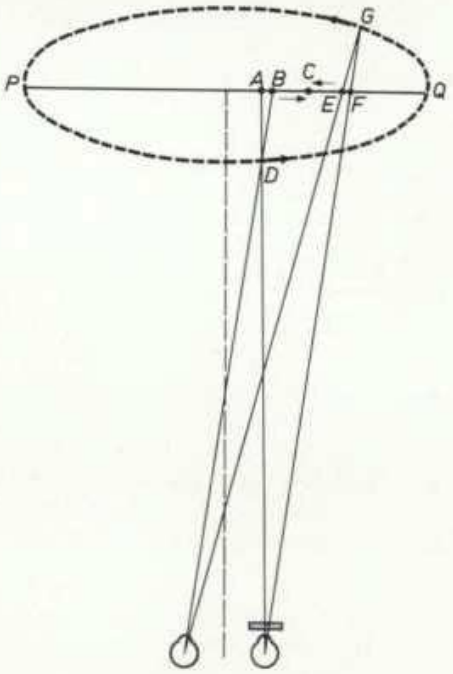


Fig. 5. Het Pulfrich-effect. We denken ons een boven de tekening opgehangen slinger die zwaait in het loodrechte vlak door de horizontale lijn PQ. We zien deze slinger met een zekere achterstand in de tijd, doordat waarnemen een zekere tijd eist — de latentietijd van de visuele waarneming. Voor één van de ogen, in de tekening is dit het rechteroog, wordt een lichtabsorberend filter gehouden. Doordat het rechteroog nu minder licht ontvangt dan het linkeroog, is de latentietijd voor het rechteroog groter dan die voor het linkeroog. Als de slinger tijdens de beweging naar rechts in C is, zien wij hem met het linkeroog in de richting B, en met het rechteroog in de richting A. Dientengevolge lijkt het voor ons of de slinger zich in D bevindt. Als de slinger in C is terwijl hij zich naar links beweegt, ziet het linkeroog hem in de richting E en het rechteroog in de richting F, zodat hij zich schijnbaar in G bevindt. De slinger beschrijft derhalve schijnbaar een kegel, waarvan het grondvlak, dat ongeveer een ellips is, in de figuur schematisch is aangegeven. Plaatsen we het filter voor het andere oog, dan verandert de schijnbare beweging van richting.

[5]) J. A. J. Roufs, Perception lag as a function of stimulus luminance, verschijnt binnenkort in Vision Research, jrg 3.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

reactietijd van de proefpersoon bevat zowel de latentietijd als de meldingstijd. Als we de intensiteit van de flits variëren, kunnen we dus wel steeds de totale reactietijd meten, maar we weten niet in hoeverre de hierbij waargenomen veranderingen toegeschreven moeten worden aan de latentietijd en in hoeverre aan de meldingstijd.

Om deze moeilijkheid te vermijden, gaan we als volgt te werk. We maken een zodanige opstelling dat voor één oog van de proefpersoon twee lichtflitsen van verschillende intensiteit kunnen worden ontstoken. Behalve de lichtintensiteit maken we nog een andere grootheid variabel, nl. het ontstekingsmoment van één van de flitsen. Aan de proefpersoon wordt nu gevraagd de ontsteking zo in te stellen dat hij de twee flitsen van verschillende intensiteit tegelijkertijd waarneemt. Het verschil in de latentietijd als gevolg van de verschillende intensiteit is gelijk aan het ingestelde verschil tussen de ontstekingsmomenten van de flitsen.

Zodoende hebben we een verandering in een subjectieve grootheid (tijd van waarneming) weten uit te drukken als een objectief meetbare verandering. We deden dit door aan de proefpersoon te vragen twee indrukken gelijk te stellen, nl. de momenten waarop de flitsen worden ervaren. Een dergelijke, met de nulmethode in de fysica vergelijkbare gelijkstellingsmethode wordt in de psychofysica veelvuldig toegepast [6]).

Fig. 6 geeft de op de beschreven wijze verkregen meetresultaten (open cirkels), waaruit blijkt dat, in een zeker intensiteitsgebied, tussen de latentietijd t_l en de intensiteit I het volgende verband bestaat:

$$t_l - t_0 = -T \ln I/I_0 . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Hierin is I_0 de willekeurig gekozen intensiteit van de flits waarvan we de intensiteit constant houden, I de intensiteit van de andere flits, en t_0 een constante, nl. de latentietijd die behoort bij een intensiteit $I = I_0$. De factor T is een voor het individuele oog kenmerkende constante (4 tot 8 ms), die zelfs voor het linker- en rechteroog van een zelfde persoon kan verschillen. Mede op grond van dit feit heeft men kunnen concluderen dat de intensiteitsafhankelijkheid van de latentietijd verband houdt met processen in het netvlies.

We komen nog even terug op de mogelijkheid om een proefpersoon het waarnemen van lichtflitsen te laten melden. De reactietijd die hierbij optreedt, kan als functie van de intensiteit worden bepaald door de proefpersoon te vragen zodra hij

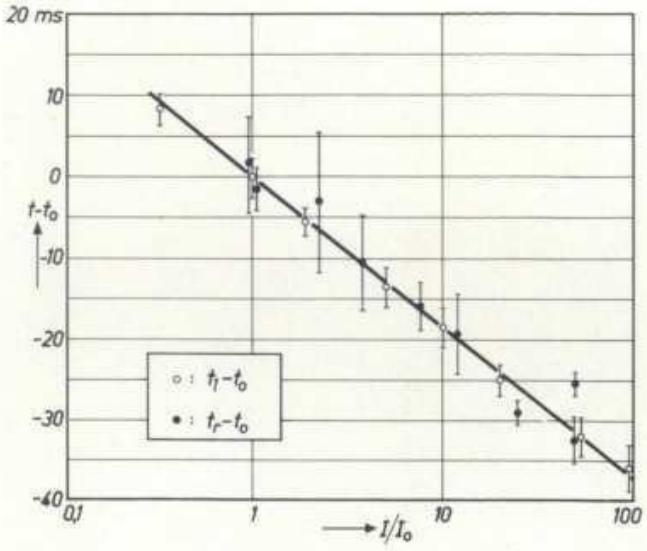


Fig. 6. In een bepaald intensiteitsgebied neemt de latentietijd t_l van de waarneming van een lichtflits lineair af met de logaritme van de intensiteit I van de flits (open cirkels). I_0 is de intensiteit van de tweede flits, die constant wordt gehouden, t_0 is de latentietijd voor $I = I_0$.

Hetzelfde verband met de intensiteit is gevonden voor de reactietijd t_r (gevulde cirkels). Daarbij is voor I_0 dezelfde waarde gekozen als bij de metingen van de latentietijd; t_0 is de bij deze intensiteit behorende reactietijd. Uit de gelijkheid van de gevonden relaties kan worden afgeleid dat de tijd nodig voor het melden van een flits niet beïnvloed wordt door de intensiteit van de flits.

In de figuur zijn tevens de 95%-betrouwbaarheidsintervallen van de meetresultaten weergegeven.

de lichtflits waarneemt een seinsleutel in te drukken. In fig. 6 zijn de op deze wijze verkregen resultaten weergegeven als gevulde cirkels. Er blijkt uit dat voor de reactietijd t_r hetzelfde verband (1) met de intensiteit I wordt gevonden als voor de latentietijd. We mogen hieruit concluderen dat de meldingstijd niet of nauwelijks verandert met de intensiteit van de gemelde lichtflits. Dit is een resultaat dat allerminst bij voorbaat vaststond.

Ten slotte willen we nog de aandacht vestigen op de nauwkeurigheid van de bij dit onderzoek toegepaste gelijkstellingsmethode. De gemiddelde spreiding der meetresultaten voor één intensiteitsinstelling bedraagt ongeveer 5 ms, hetgeen een verrassend grote nauwkeurigheid mag heten, vergeleken vooral met de gemiddelde spreiding van de reactietijdmeting, die 25 ms bedraagt.

Beïnvloeding van de helderheidsindruk door de omgevingsbelichting

Het experiment dat we als laatste in dit artikel bespreken, is wederom een voorbeeld van de toepassing van de gelijkstellingsmethode. Het maakt deel uit van een in het I. P. O. verricht onderzoek waarbij de invloed is nagegaan van bepaalde netvliesbeelden op andere. Dergelijke beïnvloedingen

[6]) Zie het artikel van J. F. Schouten in dit nummer, waarin een overzicht is gegeven van de verschillende methodes die in de psychofysica worden toegepast (blz. 340).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

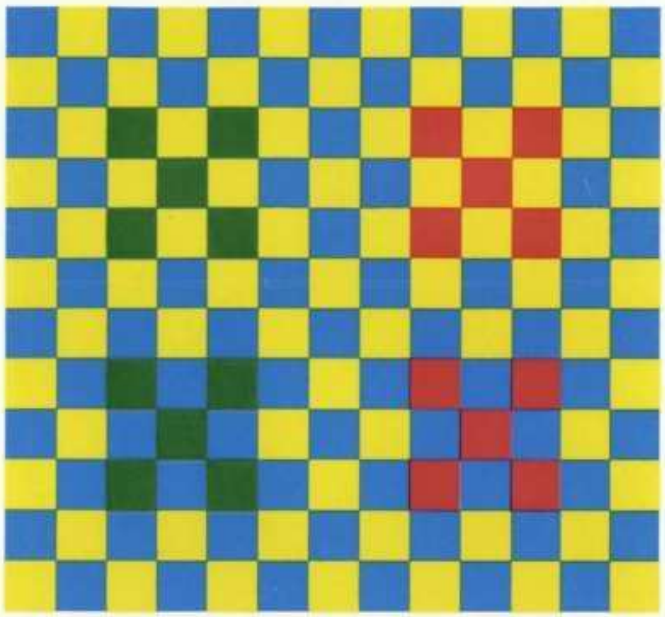


Fig. 7. De rode (groene) vierkantjes in de boven- en onderhelft van de figuur zijn identiek. Dat zij die indruk niet geven, komt door de andere omgeving waarin zij zijn geplaatst. Het effect van de omgeving op de kleurindruk is het sterkst als we op grote afstand of onder een kleine hoek naar de figuur kijken. (Ontleend aan een voordracht van W. D. Wright, gehouden op het Maxwell Colour Centenary Congress, Londen 1961.)

zijn bij de visuele waarneming zeer algemeen en vaak van uiterst complexe aard. Men kent het verschijnsel in een extreme vorm als verblinding; een sprekend voorbeeld is ook wat men waarneemt bij het bekijken van *fig. 7*.

De indruk die de bovenste groep rode (of groene) vierkantjes in de figuur op ons maakt, is niet dezelfde als die van de onderste groep vierkantjes van dezelfde kleur. In de onderste groep lijken ze donkerder te zijn en bovendien enigszins van kleur te verschillen. Objectief is er geen verschil tussen de twee groepen vierkantjes, behalve dat de bovenste vierkantjes door gele en de onderste door blauwe vierkantjes omringd zijn. De omgeving blijkt dus een zeer grote invloed op kleur- en helderheidsindruk uit te oefenen. Als we de oogafstand tot de figuur veranderen, zien we hoe de diverse kleur- en helderheidsindrukken zich wijzigen. Het effect is het meest geprononceerd als we onder een kleine hoek naar de figuur kijken (d.w.z. van grote afstand of scherend over het vlak), of als we de figuur onscherp zien.

Het hier te beschrijven experiment betrof een veel eenvoudiger situatie. Daarbij is nagegaan hoe de uniforme omgeving van een voorwerp de helderheidsindruk ervan beïnvloedt.

Voor het toepassen van de gelijkstellingsmethode maken we gebruik van het feit dat de helderheidsindruk in beide ogen onderling onafhankelijk is. Het ene oog kan derhalve als „intern ijkinstrument" fungeren voor elke meting die aan het andere oog plaatsvindt.

Bij onze onderzoekingen kijkt de proefpersoon door middel van een speciale opstelling naar de in *fig. 8* getekende velden, en hij ziet daarbij met zijn linkeroog het gestippeld aangegeven ijkveld C (in een donkere omgeving), en met zijn rechteroog het gearceerd aangegeven meetveld M. Met zijn rechteroog ziet hij tevens het eveneens gearceerde ringveld R.

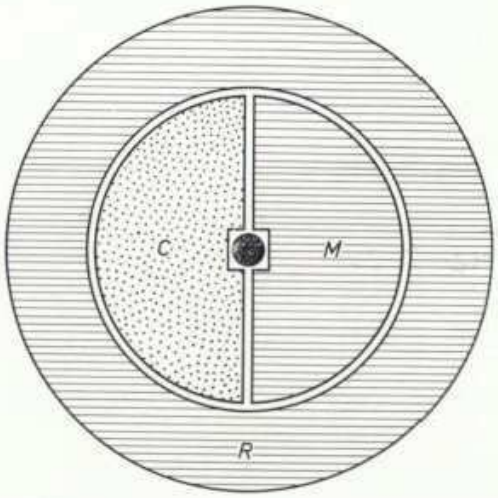


Fig. 8. Het beeld dat de proefpersoon ziet bij de proeven over de invloed van de omgeving op de helderheidsindruk van een bepaald voorwerp, volgens de gelijkstellingsmethode. Met het linkeroog ziet hij uitsluitend het gestippelde ijkveld C, en met het rechteroog de gearceerde velden, d.i. het ringveld R en het meetveld M. Bij een luminantie L_c van het ijkveld en een luminantie L_r van de ring, regelt de proefpersoon de luminantie L_m van het meetveld totdat de helderheidsindruk van ijk- en meetveld gelijk is. De centrale stip, die door beide ogen wordt waargenomen, is een fixatiehulpmiddel.

De proefpersoon krijgt nu de opdracht om bij gegeven luminanties L_c van het ijkveld en L_r van het ringveld de luminantie L_m van het meetveld zo te regelen dat de helderheidsindrukken van ijk- en meetveld gelijk zijn. Op deze wijze kunnen we nagaan hoe de luminantie van de ring de helderheidsindruk van het meetveld beïnvloedt. Het blijkt dat bij belichting van de ring in het algemeen een grotere waarde van L_m wordt gevonden dan als we de ring niet belichten. Uit deze waarneming kunnen we het bekende feit concluderen dat de belichting van de omgeving van een bepaald netvliesgedeelte in het algemeen de gevoeligheid van dat netvliesgedeelte doet afnemen.

In *fig. 9* is voor vier luminantiewaarden $L_{c1} \ldots L_{c4}$ (ijkveld) de luminantie L_m (meetveld) weergegeven als functie van de luminantie L_r (ring). De verkregen krommen zijn lijnen van constante helderheidsindruk. De luminantiewaarden van het ijkveld zijn gelijk aan de luminanties L_m op de snijpunten van de krommen met de ordinaatas;

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

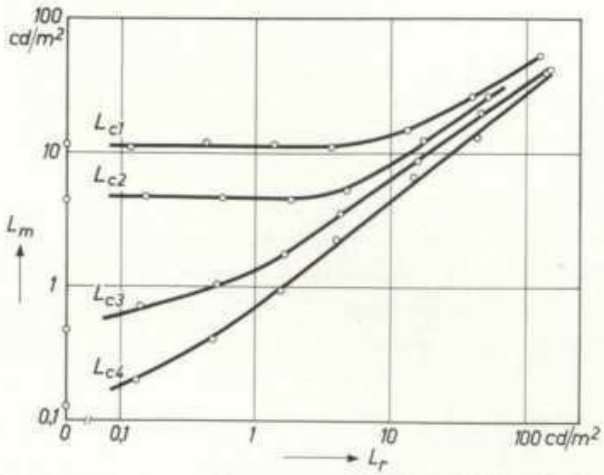


Fig. 9. De voor het verkrijgen van gelijke helderheidsindrukken in rechter- en linkeroog door de proefpersoon ingestelde luminantie L_m van het meetveld als functie van de luminantie L_r van de ring, bij vier luminantiewaarden L_c van het ijkveld. Het omhoog lopen van deze lijnen wijst erop dat de gevoeligheid van het door het meetveld beschenen netvliesgedeelte in toenemende mate vermindert onder invloed van toenemende belichting van de omgeving van dat netvliesgedeelte.

hier is de luminantie van de ring nl. nul, zodat gelijke helderheidsindruk van meet- en ijkveld optreedt voor $L_m = L_c$. Men ziet dat voor grote luminantiewaarden van het ijkveld (L_{c1} en L_{c2}) er geen vermindering van de gevoeligheid optreedt zolang de luminantie van de ring kleiner is dan de luminantie van het ijkveld. In deze grafiek valt ook op dat de lijnen van constante helderheidsindruk elkaar zeer dicht naderen als de luminantie van de ring toeneemt, hetgeen betekent dat voor een zelfde verandering van de helderheidsindruk een kleinere verandering van de luminantie nodig is naarmate de omgeving sterker wordt belicht.

Soortgelijke veranderingen van de helderheidsindruk zijn ook door enige andere onderzoekers gemeten [7]), evenwel met andere configuraties van de velden. Het bovenvermelde experiment maakte deel uit van een uitgebreid onderzoek waarin de invloed van de configuratie op de meetresultaten is nagegaan [8]). Hierbij bleek dat de verschillen in configuraties zeer belangrijk zijn. Dit onderzoek zal hier echter niet nader worden besproken, aangezien we in dit artikel alleen een indruk hebben willen geven van enkele methodes die bij metingen aan het visuele systeem worden toegepast.

[7]) Zie b.v.: E. G. Heinemann, Simultaneous brightness induction as a function of inducing-and test-field luminances, J. exp. Psychol. **50**, 89-96, 1955.

[8]) H. W. Horeman, Inductive brightness depression as influenced by configurational conditions, verschijnt binnenkort in Vision Research, jrg **3**.

Samenvatting. Beschreven worden drie in het Instituut voor Perceptie Onderzoek verrichte onderzoekingen aan het visuele systeem. Bij het eerste onderzoek is de gevoeligheid van de pupilreflex bepaald als functie van de golflengte van het invallende licht. Voor het meten van de pupildiameter is een eenvoudig hulpmiddel gebruikt, een entoptische pupillometer. Uit de metingen bleek dat de golflengte-afhankelijkheid van de pupil, tegen de verwachting in, niet samenvalt met de normale ooggevoeligheidskromme. Bij het tweede onderzoek is bepaald hoe de latentietijd die optreedt bij het waarnemen van een lichtflits, afhangt van de intensiteit van de flits. Dit is gedaan door een proefpersoon het verschil tussen de ontstekingsmomenten van twee flitsen met verschillende intensiteit zodanig te laten instellen dat hij de flitsen gelijktijdig waarneemt. De latentietijd bleek (binnen bepaalde grenzen) lineair af te nemen met de logaritme van de intensiteit. Het derde onderzoek betreft de invloed van de omgevingsbelichting op de helderheidsindruk die een bepaald voorwerp geeft. Hierbij liet men een proefpersoon de luminantie van een meetveld dat zich voor het ene oog bevindt, en dat is omgeven door een ringveld van een bepaalde luminantie, zodanig instellen dat de helderheidsindruk die het meetveld teweegbrengt, gelijk is aan de helderheidsindruk die een ijkveld met een bepaalde luminantie in het andere oog teweegbrengt. Het bleek dat, naarmate de omgevingsbelichting sterker is, relatieve veranderingen in de luminantie van een voorwerp grotere veranderingen in de helderheidsindruk geven. Dit onderzoek behoorde tot een in het artikel niet nader beschreven reeks, waarin de invloed van de configuratie van de velden op de meetresultaten werd onderzocht.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

OP ZOEK NAAR EEN MAAT VOOR DE PERCEPTIEVE ARBEID

door J. M. WESTHOFF *).

159.937:65.015.14

Door gebruik te maken van werktuigen heeft de mens reeds vanaf het begin van zijn bestaan zich lichamelijke arbeid bespaard, of prestaties geleverd die de natuurlijke menselijke krachten te boven gaan.

In de moderne industrie treedt deze tendentie wel zeer duidelijk naar voren: een toenemend aantal bewerkingen wordt door machines van de mens overgenomen. Wat overblijft, zijn handelingen die over het algemeen weinig energie vereisen, zoals ordenen, keuren, sorteren, monteren, (af)lezen en instellen. Bij deze handelingen staat het gebruik van de zintuigen op de voorgrond en ze kunnen daarom worden samengevat onder de term perceptieve arbeid. Ook buiten het veld van de industrie kan men het toenemend belang van allerlei vormen van perceptieve arbeid constateren. Wordt er op een laboratorium nog wel andere dan perceptieve arbeid verricht? En wie denkt in dit verband niet aan het moderne stadsverkeer? Een stroom van informatie komt daarbij op de weggebruiker af en moet door hem in onderdelen van seconden worden opgenomen en adequaat verwerkt.

Tot het verrichten van mechanische arbeid wordt de mens in staat gesteld door de metabolische of stofwisselingscyclus, waarbij de uit het voedsel opgenomen chemische energie in mechanische energie wordt omgezet. De perceptieve arbeid wordt mogelijk gemaakt doordat waarnemingen via verwerking door het menselijk brein leiden tot besturing van de handeling. In analogie met de zojuist aangeduide metabolische cyclus kan dit gebeuren de informatieve cyclus worden genoemd [1]). De perceptieve arbeid en de informatieve cyclus en hun onderlinge samenhang vormen een der velden van onderzoek waarop het Instituut voor Perceptie Onderzoek zich beweegt.

Bij het bestuderen van de metabolische cyclus is men redelijk goed in staat om uit de zuurstofopneming en de koolzuurproduktie de door de mens opgenomen energie en daaruit de geleverde arbeid te berekenen en in de gebruikelijke fysische eenheden, zoals de calorie, uit te drukken. Duidelijk kan men vaststellen dat bij verzwaring van de lichamelijke arbeid het lichaam meer zuurstof opneemt. Dit wijst op een intensievere „verbranding" van het opgenomen voedsel, de energiebron voor het menselijk organisme.

Het onderzoek van de perceptieve arbeid wordt pas mogelijk wanneer er ook hier een geschikte maat bestaat waarin de zwaarte van een perceptieve taak kan worden uitgedrukt. Nu kunnen weliswaar de zintuigen niet zonder stofwisseling functioneren, maar de verandering in de metabolische processen bij verzwaring of verlichting van een perceptieve taak is zo gering dat we die verandering niet als maat voor de zwaarte van een perceptieve taak kunnen gebruiken. Wie dus de werking van de zintuigen wil bestuderen en wil onderzoeken op welke wijze de door de zintuigen opgenomen informatie door het menselijk brein wordt verwerkt, dient op zoek te gaan naar andere meetgrootheden dan de energie of de zuurstofopneming.

Bij de grote verscheidenheid in bouw en de gecompliceerde werking van zintuigen en brein, is het nauwelijks denkbaar dat er één universele maat te vinden zou zijn. Men ziet dan ook dat er gedurende de laatste jaren verschillende maten zijn voorgesteld, die elk voor een bepaald soort taken of onder bepaalde omstandigheden betrouwbaar zijn, en die met elkaar vrijwel het gehele gebied van de perceptieve taken bestrijken. De drie maten zijn:

a) de hoeveelheid informatie die bij het verrichten van een taak moet worden opgenomen en verwerkt,
b) de tijd nodig voor het opnemen en verwerken van de informatie (reactietijd), of de tijd, nodig voor het uitvoeren van de taak (handelingstijd),
c) de mate waarin de prestatie in een taak vermindert onder invloed van het gelijktijdig uitvoeren van een andere taak (dubbele-taaksituatie).

In de volgende paragrafen zullen we de op deze maten gebaseerde meetmethodes beschrijven die in de afgelopen vijf jaar in het I.P.O. zijn ontwikkeld en in een reeks onderzoekingen toegepast. Uit de resultaten van deze onderzoekingen kunnen we conclusies trekken omtrent de voorwaarden waaronder een bepaalde maat mag worden gebruikt en omtrent de onderlinge vergelijkbaarheid van de verschillende maten.

Het meten van de hoeveelheid informatie

De bit

Wil men de hoeveelheid informatie die bij het verrichten van een perceptieve taak moet worden opgenomen, gebruiken als maat voor de zwaarte van die taak, dan moet men eerst voor die hoeveelheid infor-

*) Instituut voor Perceptie Onderzoek, Eindhoven.

[1]) Zie de figuur op blz. 338 van dit nummer.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

matie zelf een maat bezitten. Zulk een maat is door Shannon [2]) aangegeven, en wel op de volgende manier. Wanneer een mededeling er één is uit een serie van N mogelijke mededelingen (b.v. één van de 26 letters van het alfabet), dan is het aantal N, of een of andere functie daarvan, een maat voor de in de mededeling vervatte informatie. In de telecommunicatie, waarvoor Shannon zijn theorie heeft opgebouwd, bedient men zich steeds van de logaritmische functie met grondtal 2. Wanneer de genoemde serie uit twee mogelijkheden bestaat, dan bevat de mededeling een hoeveelheid informatie gelijk aan $^2\log 2 = 1$; de aldus gedefinieerde eenheid heeft men de naam *bit* gegeven (samentrekking van binary digit). In het I.P.O. zijn twee experimenten verricht waaruit blijkt dat het mogelijk en zinvol is om ook de hoeveelheid informatie die door de mens moet worden opgenomen en verwerkt, in bits uit te drukken.

Met het eerste experiment [3]) is gezocht naar een antwoord op de vraag welke hoeveelheid informatie de mens in een zeer kort ogenblik, b.v. 0,1 s, kan opnemen. Hierbij is gebruik gemaakt van het zg. optische kwadraat (*fig. 1*). Dit bestaat uit een vierkant dat is onderverdeeld in 64 gelijke vierkante vakjes, waarvan er een of meer tegelijk, naar vrije keuze van de proefleider, kortdurend kunnen worden verlicht. Het oplichten van één vakje vertegenwoordigt één uit 64 mogelijkheden, en men kan aan dit gebeuren dus een informatie-inhoud toekennen van $^2\log 64 = 6$ bit. Bij het oplichten van n vakjes tegelijkertijd wordt de informatie-inhoud I gegeven door de formule:

$$I = {}^2\log \frac{64!}{n!\,(64-n)!}.$$

Voor twee gelijktijdig oplichtende vakjes ($n = 2$) is I iets minder dan 11 bit. Wanneer het vierkant in een kleiner aantal vakjes wordt verdeeld, komt het oplichten van hetzelfde aantal vakjes met een kleinere hoeveelheid informatie overeen. Op deze wijze kunnen ook andere meetpunten dan bij 6 en 11 bit worden gekozen.

De proefpersoon neemt zo voor het verticaal opgestelde kwadraat plaats dat hij alle vakjes zonder bewegen van zijn ogen kan overzien. Hij krijgt de opdracht, door het noemen van de horizontale en verticale coördinaten aan te geven welke vakjes hij verlicht heeft gezien. Vergist de proefpersoon zich en duidt hij een vakje aan dat één plaats links of rechts van het juiste vakje, of één plaats erboven of eronder ligt, dan kunnen we stellen

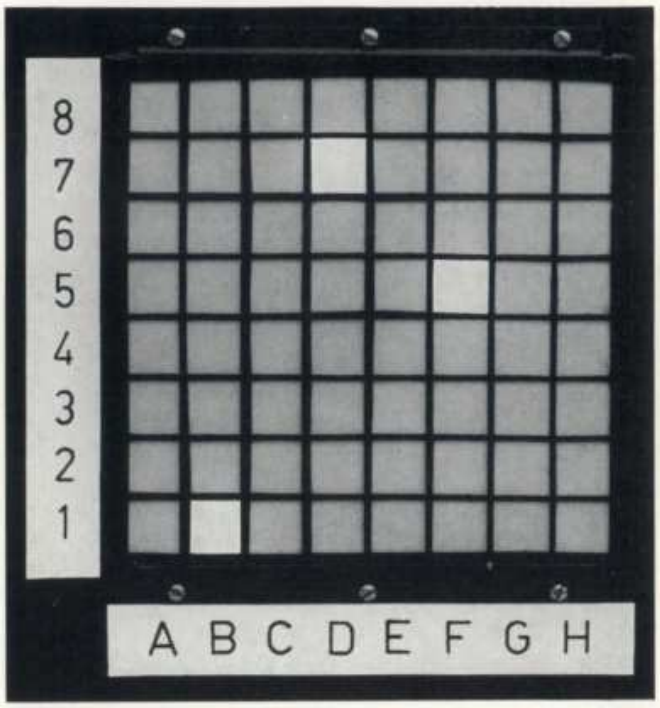


Fig. 1. Het zg. optisch kwadraat. De proefpersoon moet de coördinaten geven van de vakjes die, naar vrije keuze van de proefleider, gedurende korte tijd, b.v. 0,1 s, worden verlicht. Het identificeren van één vakje komt in deze situatie overeen met het opnemen van een hoeveelheid informatie gelijk aan $^2\log 64 = 6$ bit. Twee en drie vakjes komen resp. overeen met 10,8 en 15,4 bit informatie.

dat er 1 bit is verloren gegaan. Voor een vergissing van 1 vakje in de richting van de diagonaal kan een informatieverlies van 2 bit in rekening worden gebracht, enz. Zet men de hoeveelheid door de proefpersoon opgenomen informatie I' uit tegen de aangeboden hoeveelheid I, dan ontstaat de kromme die in *fig. 2* is weergegeven. Hieruit blijkt dat 11 bit

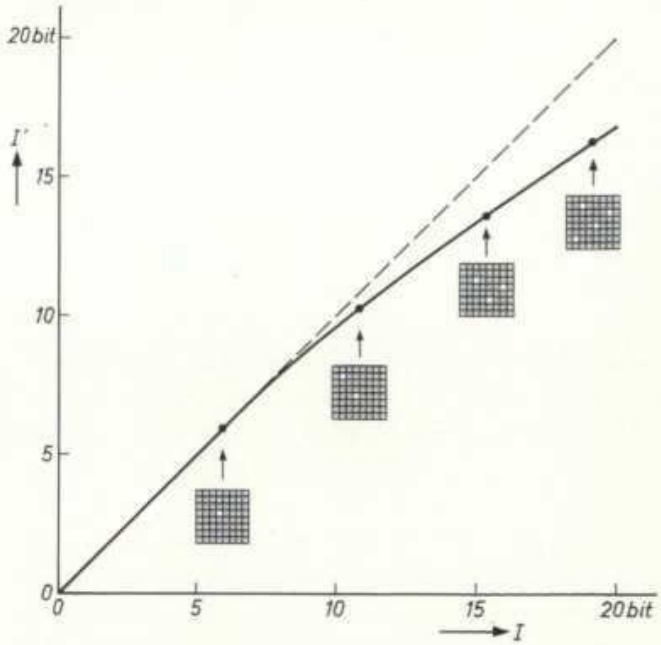


Fig. 2. Horizontaal is uitgezet de hoeveelheid in het optisch kwadraat aangeboden informatie I, verticaal de hoeveelheid I' die hiervan door de proefpersoon is gereproduceerd. Bij het aanbieden van meer dan 11 bit in 0,1 s gaat een steeds groter gedeelte van de informatie verloren.

[2]) C. E. Shannon, A mathematical theory of communication, Bell Syst. tech. J. **27**, 379-423 en 623-656, 1948.

[3]) Dit onderzoek is in het I.P.O. verricht door W. Danziger en E. P. Köster, destijds verbonden aan het Psychologisch Laboratorium van de Rijksuniversiteit te Utrecht.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

al niet meer feilloos in 0,1 s kunnen worden opgenomen. Bij het aanbieden van meer informatie gaat een steeds groter gedeelte daarvan verloren.

Het tweede experiment betreft de codes waarmee produkten of onderdelen veelal worden aangeduid, en die soms uit letters, soms uit cijfers, soms uit een combinatie van beide bestaan. In het I.P.O. is onderzocht welk type code het gemakkelijkst kortdurend kan worden onthouden. Voorbijgaande aan de uitvoering van het onderzoek, vermelden we hier alleen het resultaat: een code bestaande uit een groep van vier letters wordt even goed onthouden als een code bestaande uit een groep van vijf cijfers. Wanneer men bedenkt dat één letter en één cijfer resp. $^2\log 26$ en $^2\log 10$ bit vertegenwoordigen, vindt men dat beide genoemde codes ongeveer 17 bit informatie bevatten. Dit is een aanwijzing dat met betrekking tot de onthoudbaarheid de verschillende codes met elkaar kunnen worden vergeleken op basis van de informatie-inhoud uitgedrukt in bits.

We hebben nu laten zien op welke wijze voor het perceptieonderzoek van de bit kan worden gebruik gemaakt. We zouden echter graag nog een stap verder willen gaan, door te veronderstellen dat de zwaarte van een perceptieve taak evenredig is met het aantal bits dat moet worden opgenomen. Voor de bovenbeschreven experimenten is deze veronderstelling zeer aannemelijk, zodat we in die gevallen de bit kunnen gebruiken als maat voor de zwaarte van de taak. Uit het volgende zal echter blijken dat het niet altijd zo eenvoudig is.

Compatibiliteit

Er zijn reeds vele onderzoekingen gedaan met het doel de maximale snelheid te meten waarmee de mens informatie kan opnemen en verwerken. Steeds meer is daarbij gebleken dat deze snelheid, liggend in de buurt van 25 bit per seconde, door allerlei omstandigheden kan worden beïnvloed. Zo kunnen ziekte of vermoeidheid van de proefpersoon de informatieopneming en -verwerking aanzienlijk vertragen. Behalve deze nogal voor de hand liggende invloeden, zijn er nog andere factoren die men niet over het hoofd mag zien. We zullen dit weer met behulp van een experiment aantonen.

De proefpersoon heeft een toetsenbord voor zich waarin tien drukknoppen zo zijn geplaatst dat elk der tien vingertoppen gemakkelijk en ontspannen ligt op één der knoppen (*fig. 3*). De proefpersoon kijkt naar een paneel (het stimuluspaneel) dat bezet is met twee series van tien lampjes, de ene in dezelfde configuratie als de drukknoppen, de andere in een verticale rij. De opdracht luidt, zodra een der lampjes gaat branden, de overeenkomstige knop in te drukken, waarbij voor de verticale rij de afspraak geldt dat het bovenste lampje correspondeert met de knop onder de rechterpink. Bij dit experiment vertonen de stimuluslampjes dus een bepaald patroon, dat in het ene geval gelijkvormig is met het reactiepatroon, in het andere geval in het geheel niet. Nu kan men stellen dat er, welke configuratie van lampjes ook wordt gebruikt, bij het reageren op het aanflitsen van één lampje van de tien lampjes een hoeveelheid informatie van $^2\log 10 = 3{,}3$ bit is verwerkt. Meet men echter de reactietijd (de tijd die verloopt tussen het aangaan van het lampje en het indrukken van de knop), dan vindt men voor de verticale rij gemiddeld een hogere waarde dan voor de andere configuratie. Het blijkt dus dat de snelheid waarmee ons brein informatie kan verwerken aanzienlijk geringer is wanneer er een onnatuurlijk of ongewoon verband bestaat tussen de prikkel en het gevraagde antwoord. Fitts [4]), die dit verschijnsel aan de hand van andere experimenten heeft beschreven, voerde de term compatibiliteit in. Hij verstaat hieronder de mate van overeenstemming tussen de prikkel en de gevraagde responsie.

Uit dit voorbeeld blijkt dat de omstandigheden waaronder de informatie moet worden opgenomen en verwerkt, van invloed zijn op de snelheid waarmee dit gebeurt. Dit houdt verband met het feit dat in de informatieve cyclus een aantal stappen zijn te onderscheiden, waarvan het opnemen van informatie via de zintuigen er slechts één is. Andere stappen zijn o.m. de besluitvorming omtrent de vereiste reactie (b.v linkerwijsvinger indrukken) en het bekrachtigen van de juiste spieren [5]). In sommige gevallen waarbij voornamelijk de eerste stap een rol speelt, kan de bit redelijk goed als maat voor de zwaarte van een perceptieve taak worden gebruikt. In gecompliceerder gevallen is de hoeveelheid verwerkte informatie alleen niet meer „maatgevend", en zouden we liever de beschikking hebben over een maat die beantwoordt aan de informatieve cyclus in zijn geheel. Met de volgende experimenten is geprobeerd dit doel te benaderen.

Tijdmetingen

De handelingstijd

Van de mogelijkheid, de *duur* van de handeling te gebruiken om de zwaarte van een perceptieve

---

[4]) P. M. Fitts en C. M. Seeger, S-R compatibility, spatial characteristics of stimulus and response codes, J. exper. Psychol. **46**, 199-210, 1953.

[5]) G. ten Doesschate, Iets uit de geschiedenis van het meten van reactietijden, Philips techn. T. **24**, 383-388, 1962 (no. 11/12).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

taak aan te geven, werd in het I.P.O. gebruik gemaakt bij het onderzoek van de penmontage [6]). Het praktisch belang van dit onderzoek springt onmiddellijk in het oog wanneer men zich realiseert hoe vaak een dergelijke handeling wordt verricht. In de industrie: het plaatsen van een schroef in een voorgeboord gat; het steken van een montagedraad in een soldeerlip; het zetten van een moer of vulring op een bout. In de huishouding: het steken van de steker in het stopcontact; van de sleutel in het slot; van de draad in de naald. Het zal niemand moeilijk vallen deze rij voorbeelden met vele andere uit te breiden.

Reeds geruime tijd is bekend dat de tijd, nodig voor het steken van een pen in een gat, afhankelijk is van de afstand waarover de pen moet worden aangevoerd, de diameter van het gat en de relatieve speling van de pen in het gat. De tijdstudie-ingenieur heeft zelfs de beschikking over tabellen waarin een aantal empirisch gevonden standaardtijden zijn opgenomen, b.v. de Workfactor-montagetabel. Het leek echter interessant deze in de praktijk verkregen gegevens met behulp van een gestandaardiseerd laboratoriumexperiment te toetsen en uit te breiden door variatie van de verschillende parameters, waaronder met name de speling, over een veel groter gebied dan waarop de Workfactor-tabel betrekking heeft. Bij het experiment heeft de proefpersoon de beschikking over vijf metalen platen, in elk waarvan een gat is geboord van resp. 1, 2, 4, 8 en 16 mm diameter (*fig. 4*). Rond elk gat is een cirkel aangebracht met een straal van 25 mm, de zg. start-

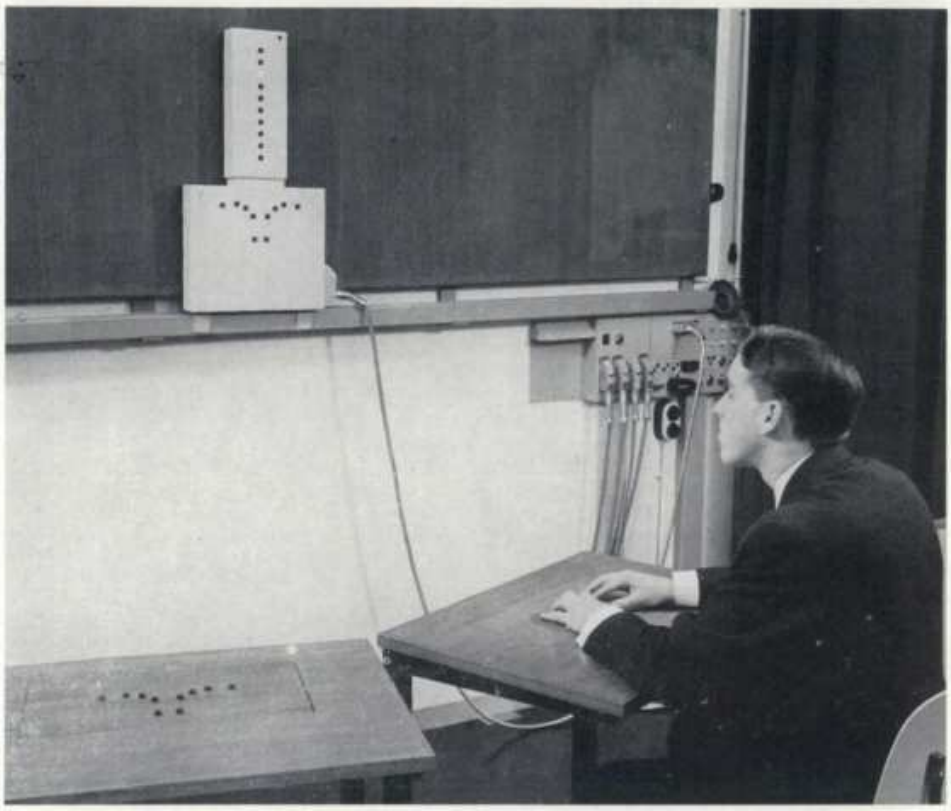


Fig. 3. Opstelling waarmee de invloed van de compatibiliteit (mate van overeenstemming tussen stimulus en responsie) op de reactietijd kan worden onderzocht. De proefpersoon moet bij aanflitsen van een der lampjes op het stimuluspaneel (links boven) zo snel mogelijk reageren met het indrukken van de overeenkomstige knop op het reactiepaneel waarop zijn handen liggen. Op het onbezette tafeltje is zulk een reactiepaneel te zien; de knoppen zijn in een zodanig patroon geplaatst dat ze zeer gemakkelijk met de vingertoppen kunnen worden bediend. De lampjes worden in een toevalsvolgorde ontstoken. Zijn de patronen van lampjes en knoppen gelijkvormig, dan is de reactietijd gemiddeld korter dan wanneer deze patronen geheel verschillend zijn, zoals het geval is bij de verticale rij lampjes.

De getoonde opstelling maakt deel uit van de reactiemeter DONDERS, die elders in dit nummer wordt beschreven (zie blz. 378). Twintig proefpersonen, ieder gezeten voor een reactiepaneel, kunnen gelijktijdig aan het experiment deelnemen. De installatie registreert van alle proefpersonen tegelijk de reactietijd en de ingedrukte knop.

[6]) J. F. Schouten, J. Vredenbregt en J. J. Andriessen, On the laws governing the times needed for pin-mounting as a function of diameter and tolerance, Ergonomics **3**, 275, 1960.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

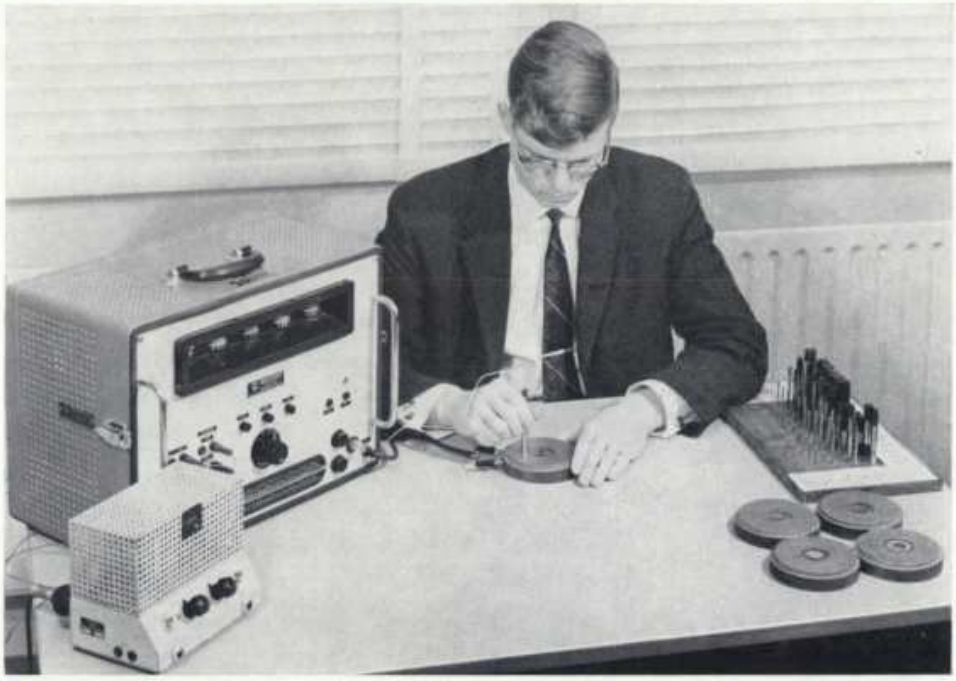


Fig. 4. Opstelling voor het meten van de handelingstijd bij een penmontage (steken van een pen in een gat). De duur van de montagehandeling wordt gemeten met de elektronische teller, links van de proefpersoon. De teller wordt in werking gesteld op het moment dat de pen de startcirkel verlaat (en daarmee een elektrische keten verbreekt), en telt het aantal honderdste seconden tot het moment dat de pen de bodem van het gat raakt (waardoor het contact weer wordt hersteld). Om een voldoende betrouwbaar gemiddelde te verkrijgen, worden met elke pen 100 montages uitgevoerd. Rechts op de tafel ziet men nog een aantal platen met gaten van verschillende diameters, en pennen die met verschillende spelingen in de gaten passen.

cirkel. Bij elke plaat hoort een stel pennen, met zodanige diameters dat, uitgaande van een speling van 50% tussen pen en gat, elke volgende pen de helft van de speling van de voorgaande heeft. De proefpersoon krijgt de opdracht de pen zo snel mogelijk vanaf de startcirkel tot op de bodem van het gat te brengen. Pen en plaat zijn in een elektrische keten opgenomen, zodat een elektronische klok in werking kan worden gesteld op het moment dat de pen van de startcirkel wordt gelicht, en de klok stopt zodra de bodem van het gat is bereikt. De tijd die na het volbrengen van de montage kan worden afgelezen, noemen we de handelingstijd. Het spreekt vanzelf dat, vooral bij kleine speling, de tijd nodig voor het monteren van dezelfde pen in hetzelfde gat door dezelfde proefpersoon niet steeds even lang is. De handeling wordt dan ook per pen en per proefpersoon honderd maal uitgevoerd, ten einde een betrouwbaar gemiddelde te krijgen. In *fig. 5* is het resultaat van dit experiment weergegeven. Elke lijn geeft voor een bepaalde gatdiameter het verband tussen de montagetijd t_m en de relatieve speling σ tussen pen en gat, uitgedrukt in een percentage van de gatdiameter. Uit de grafiek zijn twee conclusies te trekken: a) Er bestaat een logaritmisch verband tussen de montagetijd en de relatieve speling, want de lijnen zijn rechten bij een logaritmische schaal op de horizontale as. b) Er is eveneens een logaritmisch verband tussen de montagetijd en de gatdiameter, want de lijnen zijn equidistant, terwijl de gatdiameters onderling een meetkundige reeks vormen.

Wij kunnen deze experimenteel gevonden betrekkingen verklaren door de montagehandeling op te vatten als een gestuurd proces, dat als volgt kan worden beschreven. De hand beweegt de pen in de

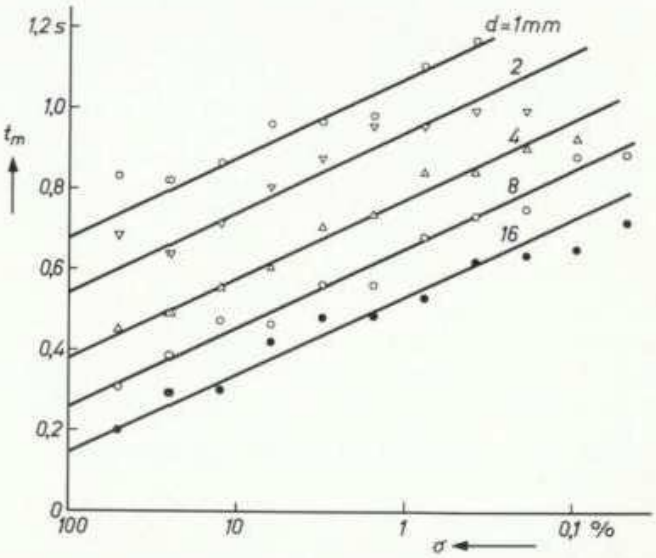


Fig. 5. Verband tussen de montagetijd t_m en de relatieve speling σ van de pennen voor verschillende waarden van de gatdiameter d. Zowel tussen t_m en σ als tussen t_m en d blijkt een logaritmisch verband te bestaan.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

richting van het gat in de plaat. De menselijke zintuigen (het oog, de tastzin, de spiergewrichtzin) verschaffen tijdens deze beweging informatie over de gemaakte fout. Hierbij verstaan we onder fout de afstand tussen de middellijn van de pen en de middellijn van het gat. Deze informatie wordt door ons brein verwerkt, hetgeen resulteert in een correctie van bewegingsrichting en -snelheid. Neemt men aan dat de aangebrachte correctie telkens de gemaakte fout halveert, dan moet de montagetijd evenredig toenemen met de negatieve logaritme van de relatieve speling bij gebruik van hetzelfde gat (*fig. 6*). Hetzelfde geldt voor verschillende diameters wanneer pennen worden gebruikt met dezelfde relatieve speling. Uit aanvullende experimenten is gebleken dat het genoemde proces van het telkens tot de helft terugbrengen van de gemaakte fout pas begint als de pen reeds tot op een bepaalde, steeds gelijke, afstand x_0 van het gat is genaderd. Dienovereenkomstig slaat in fig. 6 het tijdstip $t = t_0$ op de aanvang van deze tweede faze van de montage. Verder spreekt het vanzelf dat de pen zich in werkelijkheid niet volgens de geïdealiseerde kromme van fig. 6 naar het gat toe beweegt, maar volgens een kromme die zich daar omheen slingert. Dit wordt duidelijk gedemonstreerd door een stroboscopische opname van een montage en de daarbij behorende kromme (*fig. 7* en *fig. 8*).

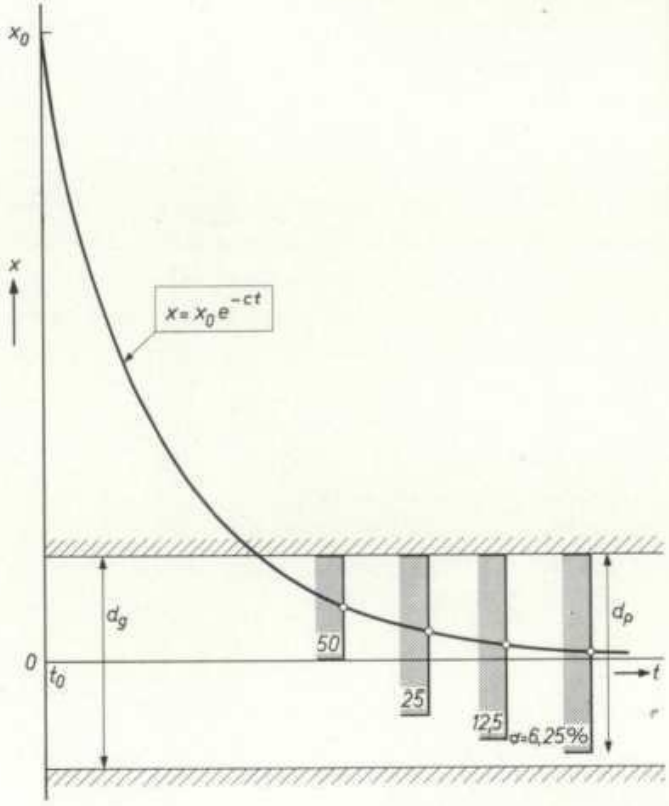


Fig. 6. Ter verklaring van het logaritmisch verband tussen montagetijd t_m en speling σ. Neemt de gemaakte fout x (d.i. de afstand tussen de middellijn van het gat en die van de pen) in gelijke tijden steeds met een zelfde factor af, dan beweegt de pen (diameter d_p) volgens de aangegeven kromme naar het gat (diameter d_g) toe. In de grafiek zijn vier pennen met spelingen gelijk aan 50, 25, 12,5 en 6,25% van de gatdiameter getekend op het moment dat ze het gat kunnen binnengaan. Halvering van de speling σ blijkt telkens een zelfde toeneming van de montagetijd t_m tot gevolg te hebben.

Fig. 7. Stroboscopische foto van een penmontage bij een gatdiameter van 4 mm en een speling van 0,1%. De belichting geschiedde met tussenpozen van 0,1 seconde. Door de trouwring te volgen, kan men zien dat er nog 0,3 s voor nodig is om de pen van de bovenkant naar de bodem van het gat te brengen.

Interessant is ook de uitslag van het experiment waarbij de opdracht aan de proefpersoon als volgt is gewijzigd. Luidt in het eerste experiment de instructie, de montage zo snel mogelijk uit te voeren, in het tweede experiment wordt gemonteerd met drie verschillende snelheden, die de proefpersoon voor de aanvang van het experiment zijn geleerd.

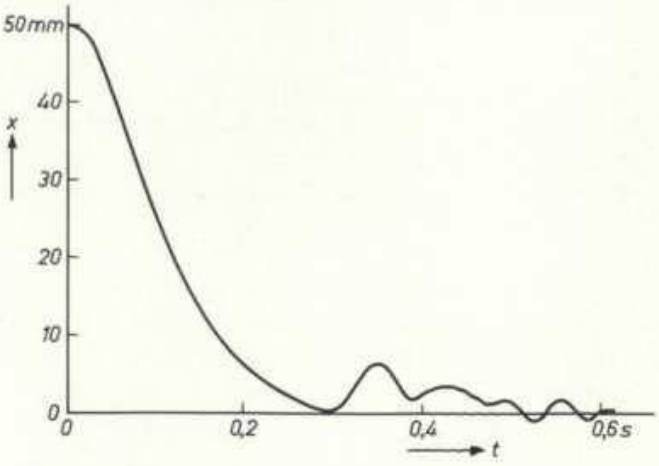


Fig. 8. Het bij fig. 7 behorende weg-tijd-diagram van de montage.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De meetresultaten worden weergegeven in *fig. 9*: drie evenwijdige rechten voor geringe, matige en maximale snelheid bij telkens dezelfde waarde van de gatdiameter. De stukken die de rechten op de verticale as afsnijden, komen overeen met $\sigma = 100\%$, d.w.z. met een pen met diameter gelijk nul. Deze stukken kunnen worden geïnterpreteerd als de tijd die nodig is om de pen van de startcirkel naar het gat te brengen. De helling van de lijnen komt overeen met de toeneming van de montagetijd die het

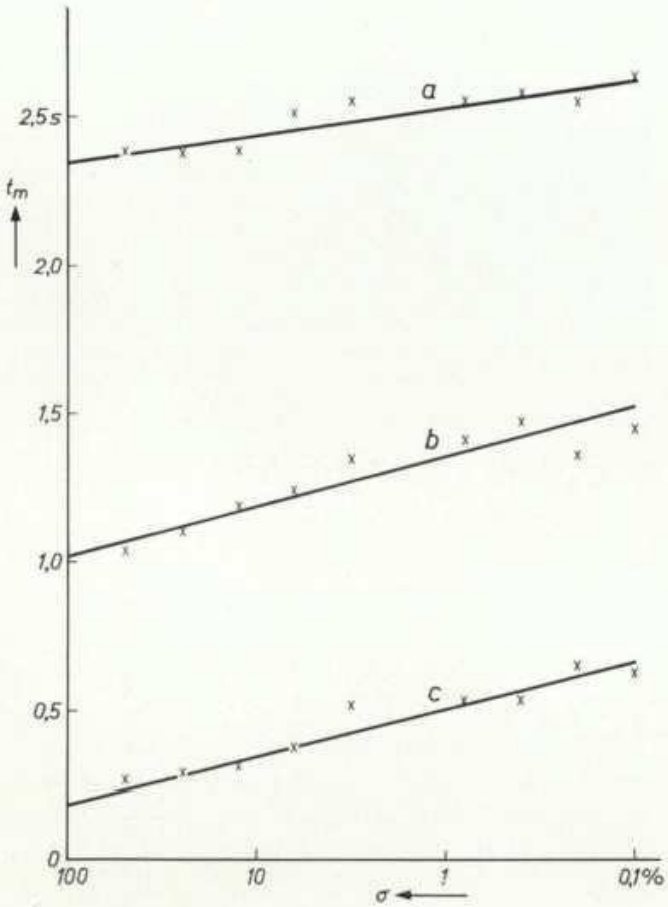


Fig. 9. Verband tussen montagetijd t_m en speling σ wanneer de penmontage met geringe (*a*), matige (*b*) en maximale snelheid (*c*) wordt uitgevoerd. De stukken die door de lijnen op de verticale as worden afgesneden, komen overeen met de tijd die nodig is voor het aanvoeren van de pen. Uit de evenwijdigheid der lijnen kan worden afgeleid dat het eigenlijke zoeken van het gat geschiedt volgens een proces waarvan de snelheid niet door de wil van de proefpersoon beïnvloed kan worden.

gevolg is van de steeds grotere nauwkeurigheid waarmee, bij kleiner wordende spelingen, moet worden gewerkt. Uit de evenwijdigheid van de lijnen volgt dat de voor het bereiken van de grotere nauwkeurigheid nodige tijd onafhankelijk is van de snelheid waarmee de handeling wordt uitgevoerd. Met andere woorden: dat deel van de handeling waarin de bewegingscorrecties worden uitgevoerd, onttrekt zich, voor zover het de snelheid betreft, aan de menselijke wil.

De reactietijd

In de vorige paragraaf hebben we het monteren van een pen in een gat beschreven als een gestuurd proces. Men kan dit uitbreiden door het gehele menselijk handelen vanuit dit gezichtspunt te beschouwen: er is een mechanisch systeem (het spierapparaat), een meetapparatuur (de zintuigen) en een rekentuig (het brein) dat op grond van de door de meetapparatuur verstrekte informatie het mechanische systeem commandeert. In een geval als dat van de penmontage bedient de mens zich voornamelijk van het mechanische systeem en van de meetapparatuur; de handelingstijd is dan de tijd die deze er samen voor nodig hebben om de opdracht uit te voeren. In andere gevallen moet het brein eerst een hoeveelheid informatie verwerken en er conclusies uit trekken, en er zal dan enige tijd verlopen tussen het begin van de zintuiglijke waarneming en de reactie erop. Men noemt deze tijd de reactietijd. Hoe in een eenvoudig geval deze reactietijd samenhangt met de hoeveelheid informatie die moet worden verwerkt, blijkt uit het volgende experiment. Hierbij kregen honderd proefpersonen de opdracht een stel speelkaarten volgens verschillende systemen te sorteren, b.v.:

a) Leg de kaarten vanuit de hand één voor één op dezelfde stapel.
b) Sorteer naar rood en zwart.
c) Sorteer naar klaveren, ruiten, harten, schoppen.
d) Sorteer naar de dertien verschillende waarden van de kaarten.
e) Leg het spel uit op een tableau, waarop reeds een stel kaarten op de te sorteren wijze is aangebracht.

Zet men de gemiddelde tijd, nodig voor het wegleggen van één kaart, uit als functie van het aantal te maken stapeltjes, dan blijkt deze tijd lineair toe te nemen met de ^{2}log van het aantal stapeltjes (*fig. 10*). Met andere woorden, er is een lineair verband tussen de logaritme van het aantal mogelijkheden waaruit men moet kiezen (= het aantal bits), en de tijd die voor die keuze nodig is. In dit geval is het dus mogelijk de tijdmeting te correleren aan de maat die in het vorige hoofdstuk is aangegeven voor de zwaarte van een perceptieve taak, nl. de hoeveelheid te verwerken informatie.

Bezien wij de experimenten uit deze en de vorige paragraaf nog eens nader, dan kan worden vastgesteld dat het meten van de tijd ons interessante gegevens heeft verschaft over de belasting veroorzaakt door het verrichten van een perceptieve taak. Ook zullen we, wanneer we ons althans beperken tot het vergelijken van taken met dezelfde „arbeidsinhoud" (b.v. penmontages met verschillende gatdiameters,

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

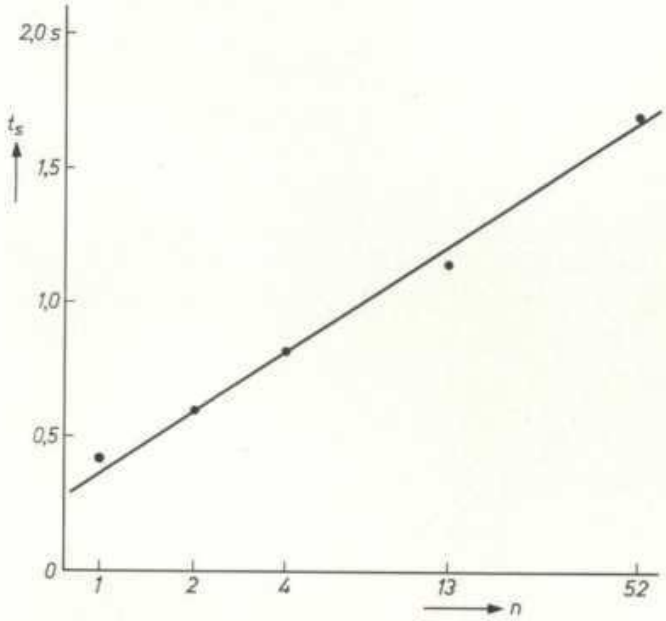


Fig. 10. Gemiddelde neerlegtijd t_s als functie van het aantal stapels n waarin een spel kaarten wordt gesorteerd. We vinden een lineair verband tussen de gemiddelde neerlegtijd en de logaritme van het aantal stapels.

enz.), de duur van de handeling kunnen gebruiken als maat voor de zwaarte van de taak. In de praktijk wordt dit reeds veelvuldig toegepast (de genoemde Workfactor-tabellen). Maar het is niet mogelijk om de zwaarte van *verschillende* taken (b.v. een montage en een sorteertaak) met behulp van de duur van de handeling tegen elkaar af te wegen. We hebben immers niet voor niets in het ene geval van handelings- en in het andere van reactietijd gesproken. Bij de nu volgende experimenten wordt een maat ingevoerd die wel deze mogelijkheid blijkt te bieden.

Dubbele-taaksituatie

Iedere automobilist is in staat tijdens het besturen van zijn auto een gesprek te voeren. In wezen verricht hij dan twee perceptieve taken tegelijk. Het feit dat het gesprek stokt telkens als de verkeerssituatie de aandacht van de bestuurder in sterke mate bindt en talrijke en snelle reacties vereist, bewijst dat de perceptieve capaciteit van de mens beperkt is en dat het verrichten van de ene taak de prestaties in de andere taak beïnvloedt, zelfs al zijn er geheel andere zintuigen en spieren bij betrokken. Uitgaande van deze gedachte is in ons instituut de capaciteitsmeter [7]) ontwikkeld, een meetapparatuur waarmee verschillende perceptieve taken wat betreft hun zwaarte met elkaar kunnen worden vergeleken. Men draagt de proefpersoon op, twee taken tegelijkertijd uit te voeren. Een van de twee is de taak waarvan men de zwaarte wil meten (te meten taak), de andere is steeds dezelfde (standaardtaak). Nadat de proefpersoon aanvankelijk de te meten taak afzonderlijk heeft verricht, moet hij in geleidelijk stijgend tempo de standaardtaak erbij gaan uitvoeren. Men kan nu aan de wijze waarop de prestatie in de te meten taak hierdoor wordt beïnvloed, een maat voor de zwaarte van deze taak ontlenen.

De standaardtaak bestaat in het neerdrukken van een pedaal onder de linkervoet of onder de rechtervoet al naar gelang een lage (250 Hz) of een hoge toon (2000 Hz) in een hoofdtelefoon hoorbaar wordt (*fig. 11*). De tonen worden volgens een toevalsprogramma aangeboden met een tempo dat regelbaar is van 10 tot 120 maal per minuut. Voor de aanvang der experimenten oefent de proefpersoon zich in de standaardtaak en wordt er gemeten welk tempo door hem maximaal foutloos kan worden bereikt. Tijdens het experiment mag hij in de uitvoering van de standaardtaak geen fouten meer maken. De keuze viel op deze standaardtaak omdat nu de ogen en de handen beschikbaar blijven en er dus een grote ver-

Fig. 11. Capaciteitsmeter, ontwikkeld in het Instituut voor Perceptie Onderzoek. Om de zwaarte van een perceptieve taak (hier het monteren van een ring en een moer op een bout) te meten, wordt nagegaan in welke mate de prestatie in deze taak daalt wanneer tegelijkertijd in geleidelijk stijgend tempo een standaardtaak moet worden uitgevoerd. De standaardtaak bestaat in het indrukken van het rechter of het linker pedaal, al naar gelang in de hoofdtelefoon een hoge of lage toon klinkt. De tonen worden volgens een toevalsprogramma en in een regelbaar tempo aangeboden met behulp van een ponsband. Rechts naast de ponsbandlezer staat de teller waarmee het aantal goede reacties wordt geregistreerd, evenals het aantal gemaakte fouten, gesorteerd in twee categorieën: te late reacties en foutieve reacties.

[7]) J. F. Schouten, J. W. H. Kalsbeek en F. F. Leopold, On the evaluation of perceptual and mental load, Ergonomics **5**, 251-260, 1962.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

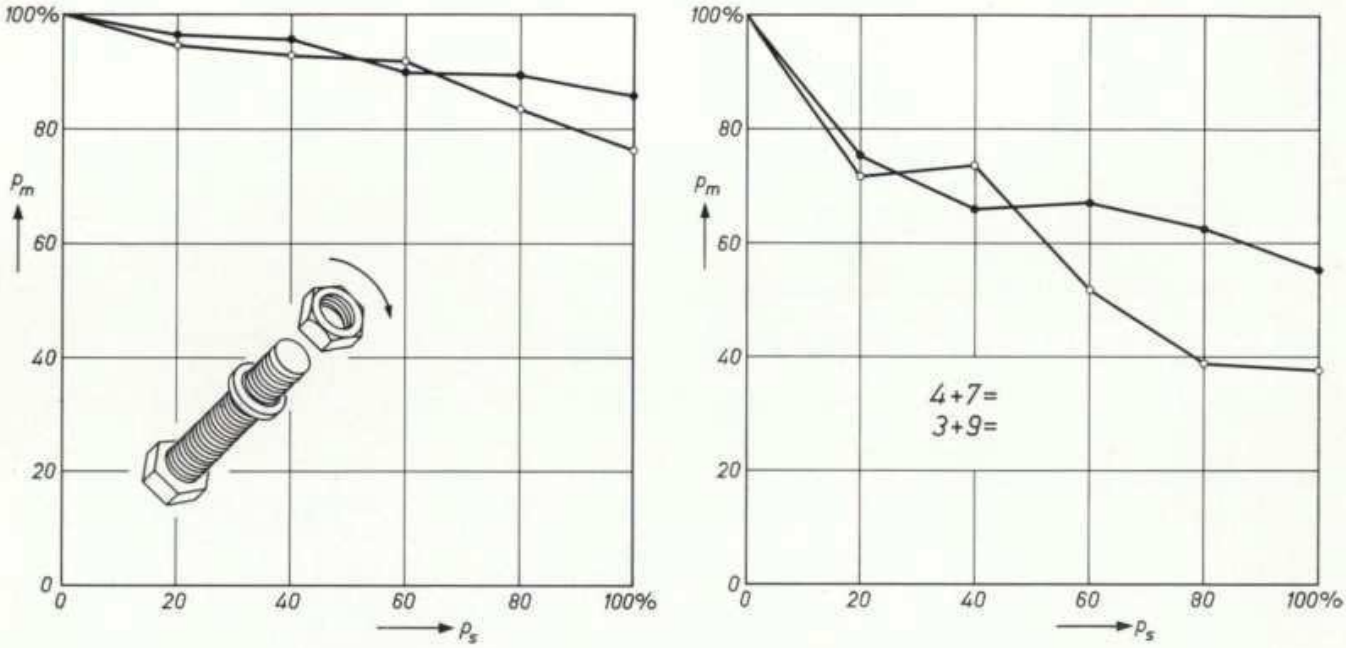
www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

scheidenheid van te meten taken kan worden onderzocht.

In *fig. 12* ziet men voor twee taken hoe de prestatie in de te meten taak vermindert doordat de prestatie in de standaardtaak moet worden opgevoerd. Als 100% geldt de prestatie die wordt geleverd wanneer de standaardtaak resp. de te meten taak afzonderlijk in maximaal tempo wordt uitgevoerd. Het blijkt dat het monteren van een ring en een moer op een bout veel minder wordt beïnvloed door de standaardtaak dan het doen van eenvoudig rekenwerk. Andere onderzoekers [8] [9] [10] komen met andere experimenten tot overeenkomstige resultaten.

Als men aanneemt dat er bij de mens een samenhang bestaat tussen de prestatie en de perceptieve belasting bij het verrichten van een taak, dan kan de helling van de krommen in fig. 12 een maat zijn voor de zwaarte van de taak. Immers: hoe groter het deel van de aandacht dat bij het verrichten van die taak in beslag wordt genomen, des te meer zal de prestatie daarin dalen wanneer in toenemende mate de aandacht wordt opgeëist voor het verrichten van de standaardtaak.

Het ziet er dus naar uit dat hier een goede mogelijkheid ligt om de perceptieve belasting van verschillende taken ten opzichte van elkaar af te wegen. Deze methode kan ook worden toegepast op taken die het gebruik van zowel handen als voeten vereisen (b.v. autorijden), indien daarvoor andere standaardtaken worden bedacht. De verschillende standaardtaken zullen dan ten opzichte van elkaar moeten worden geijkt.



a *b*

Fig. 12. Prestatie p_m in twee perceptieve taken, *a*) montage en *b*) eenvoudig rekenwerk, als functie van de prestatie p_s in de standaardtaak, elk voor twee proefpersonen. De prestatie wordt gemeten naar het aantal verrichtingen per tijdseenheid die de proefpersoon onder de gegeven omstandigheden uitvoert. Als 100% geldt de prestatie die de proefpersoon levert wanneer hij de desbetreffende taak afzonderlijk in het maximale tempo verricht. Voor elk meetpunt krijgt de proefpersoon de gelegenheid om dat tempo voor de te meten taak te vinden waarbij hij de standaardtaak met het opgelegde tempo en met niet meer dan 1 fout per minuut kan uitvoeren.

Behalve bij het waarderen van een perceptieve taak, kan de capaciteitsmeter ook nuttige diensten bewijzen bij het onderzoeken van de manier waarop de menselijke geest door het verrichten van een perceptieve taak wordt beïnvloed [5]). Daartoe geeft men de proefpersoon b.v. de opdracht om te schrijven, waarbij het onderwerp geheel aan hemzelf wordt overgelaten. Wordt de proefpersoon tot een toenemende prestatie in de standaardtaak gedwongen, dan constateert men verschijnselen als kinderlijk schrift, meer concrete en banale inhoud, herhalingen, spelfouten en inversies (*fig. 13*), verschijnselen die eveneens optreden bij geestelijke vermoeid-

[8]) E. Bornemann, Untersuchungen über den Grad der geistigen Beanspruchung, Arbeitsphysiologie **12**, 142-192, 1942.
[9]) E. C. Poulton, Measuring the order of difficulty of visual-motor tasks, Ergonomics **1**, 234-239, 1958.
[10]) I. O. Brown en E. C. Poulton, Measuring the spare "mental capacity" of cardrivers by a subsidiary task, Ergonomics **4**, 35-40, 1961.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

heid en ziekelijke persoonlijkheidsafbraak. Een andere mogelijkheid is, de proefpersoon als te meten taak een intelligentietest te laten uitvoeren. Het daarin behaalde resultaat blijkt slechter te worden naarmate de prestatie in de standaardtaak hoger is. De uitslagen van deze experimenten wijzen er op dat de proefpersoon door het verrichten van een perceptieve taak schijnbaar een lagere intelligentie krijgt. Resultaten van een nadere bestudering van dit verschijnsel kunnen op den duur de ergonoom wellicht helpen te voorspellen wanneer en in welke mate een arbeider in een dubbele-taaksituatie fouten zal maken. Bij het opstellen van een taakverdeling of bij het kiezen van de omstandigheden waaronder het werk moet worden verricht, kan hiermee dan rekening worden gehouden.

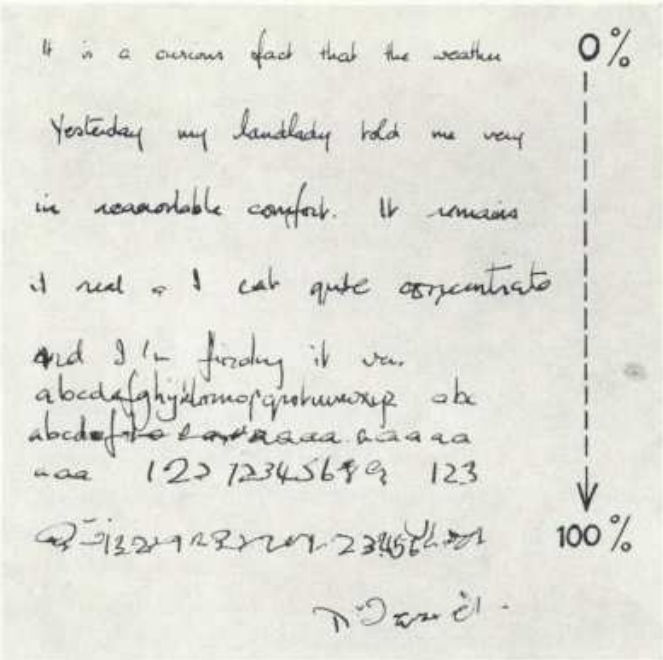


Fig. 13. Voorbeeld van spontaan schrijven als te meten taak bij geleidelijk toenemende prestatie in de standaardtaak. Elke regel in de figuur is een voorbeeld, genomen uit een geheel vel dat de proefpersoon heeft volgeschreven, terwijl hij de standaardtaak in een bepaald tempo uitvoerde. Bij het stijgen van het tempo in de standaardtaak constateert men duidelijk het kinderlijk worden van het schrift, de steeds meer concrete en banale inhoud, het maken van fouten, e.d.

Samenvatting. De gebruikelijke fysische eenheden (zoals de calorie) waarin de menselijke mechanische arbeidsprestatie kan worden uitgedrukt, zijn niet bruikbaar als maat voor de perceptieve arbeidsprestatie. Op drie manieren is een poging gedaan om in een maat voor de zwaarte van een perceptieve taak te voorzien. Voor een bepaalde categorie van taken kan de hoeveelheid op te nemen informatie als maat worden gebruikt. In andere gevallen komen als maat voor de zwaarte in aanmerking de handelingstijd die nodig is, b.v. voor het monteren van een pen in een gat, of de reactietijd die verloopt tussen stimulus en responsie. Om ook geheel verschillende taken wat betreft hun zwaarte tegen elkaar te kunnen afwegen, waarvoor de genoemde maten niet geschikt zijn, is de capaciteitsmeter ontwikkeld. Hierbij moet de proefpersoon een te meten taak uitvoeren tegelijk met een standaardtaak waarin de prestatie geleidelijk moet worden opgevoerd, met als gevolg dat de prestatie in de te meten taak afneemt. De helling van de kromme die deze afneming weergeeft, kan dienen als maat voor de zwaarte van de taak.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

DE „DONDERS", EEN ELEKTRONISCH MEETSYSTEEM VOOR MENSELIJKE REACTIES

door J. F. SCHOUTEN *) en J. DOMBURG **). 159.938.343

De snelheid van de menselijke reactie

Wordt de mens een bepaalde prikkel (stimulus) uit een stel mogelijke stimuli aangeboden en heeft hij de opdracht, op deze stimulus te reageren door het indrukken van één uit een stel knoppen, dan zal hij dit slechts kunnen volbrengen in een bepaalde tijd: de reactietijd. Deze tijd is het kortst — iets minder dan 0,2 seconde — indien er slechts één stimulus mogelijk is, b.v. een lichtflits, en er slechts één knop ter beschikking staat. In afhankelijkheid van het aantal mogelijke stimuli en reacties neemt de reactietijd toe, en wel met ongeveer 0,1 seconde per factor 2 in dit aantal.

Indien onze handelingen onze waarnemingen met deze lange reactietijden volgden, zou het er slecht voor ons uitzien. De paukenist zou op zijn minst 0,2 seconde (de tijd verlopende tussen twee tikken van een horloge) achterblijven bij de aanwijzing van de dirigent, of het danspaar bij de maat van de muziek. Bij het doelen op een voorwerp dat met een snelheid van slechts 1 meter per seconde (3,6 km per uur) langs ons voorbijkomt, zouden wij er op zijn minst 20 cm naast grijpen!

Deze inherente traagheid van ons reactiesysteem wordt echter voor een groot gedeelte gecompenseerd door ons vermogen om waarnemingen en handelingen te anticiperen. De paukenist bereidt zijn handeling dusdanig voor dat de slag coïncideert met de gegeven aanwijzing van de dirigent, het danspaar stelt zich in op een zodanig ritme dat de passen coincideren met de maat van de muziek. En evenals de jager niet mikt op het bewegend wild zelf, maar op de plaats waar hij verwacht dat het wild zich zal bevinden wanneer de hagel de geschatte baan van het wild bereikt, zo mikken wij bij het grijpen, slaan of trappen op de plaats waar wij verwachten dat het voorwerp zal zijn aangeland wanneer onze hand of voet zijn baan bereikt.

Door deze vernuftige kunstgreep zijn wij ondanks onze trage reactie in staat, een nauwkeurigheid in de tijd van ongeveer 0,03 seconde te bereiken. In het genoemde geval van het bewegende voorwerp betekent dit een resterende onnauwkeurigheid van slechts 3 cm.

Tot de traagheid van onze reactie dragen veel factoren bij: het tot stand komen van de zintuiglijke gewaarwording, het herkennen van de stimulus, het beslissen over de te verrichten handeling en het ten uitvoer brengen van de handeling. De Nederlandse fysioloog Donders heeft in 1868 geponeerd dat wij weliswaar misschien nimmer zullen weten wat de menselijke gedachte is, maar dat wij tenminste de *duur* van de gedachte kunnen meten [1]). Sindsdien is het meten van reactietijden steeds een belangwekkend onderwerp gebleven. Het belang ervan is nog toegenomen sinds de informatietheorie het begrip informatie kwantitatief heeft geformuleerd en het verwerken van informatie geïnterpreteerd als een proces van voortschrijdende keuzen.

De grote moeilijkheid bij het meten van reactietijden is dat het voor de wetenschappelijke onderzoeker bijzonder tijdrovend is. Wil hij over voldoende materiaal beschikken, dan moet aan proefpersonen een omvangrijk programma van stimuli worden aangeboden en de reactietijden moeten met een bepaalde nauwkeurigheid worden gemeten, vastgelegd en ten slotte verwerkt. Het is duidelijk dat het uitdenken en inrichten van een totale proef en ook de analyse van de geconsolideerde resultaten te beschouwen zijn als intelligent werk. Daarentegen moeten het afwikkelen van een meetprogramma en het meten, vastleggen en verwerken — voor zoverre dit het zuiver repetitieve aandeel betreft — worden gekwalificeerd als geestdodend werk.

Uit dien hoofde zijn indertijd in het Instituut voor Perceptie Onderzoek richtlijnen voor een elektronisch systeem opgesteld dat deze niet-intelligente werkzaamheden automatisch uitvoert. Vervolgens is in Philips' Natuurkundig Laboratorium de ontwikkeling van zulk een systeem ter hand genomen. Ter ere van onze zoëven genoemde landgenoot hebben wij dit systeem de naam DONDERS gegeven.

Richtlijnen voor het ontwerp van de DONDERS

Operationele richtlijnen

Verlangd wordt dat reactietijden van 0,01 tot 4,00 seconden meetbaar zijn in stappen van 0,01 seconde.

*) Instituut voor Perceptie Onderzoek, Eindhoven.
**) Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven.

[1]) G. ten Doesschate, Iets uit de geschiedenis van het meten van reactietijden, Philips techn. T. **24**, 383-388, 1962 (no. 11/12).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info

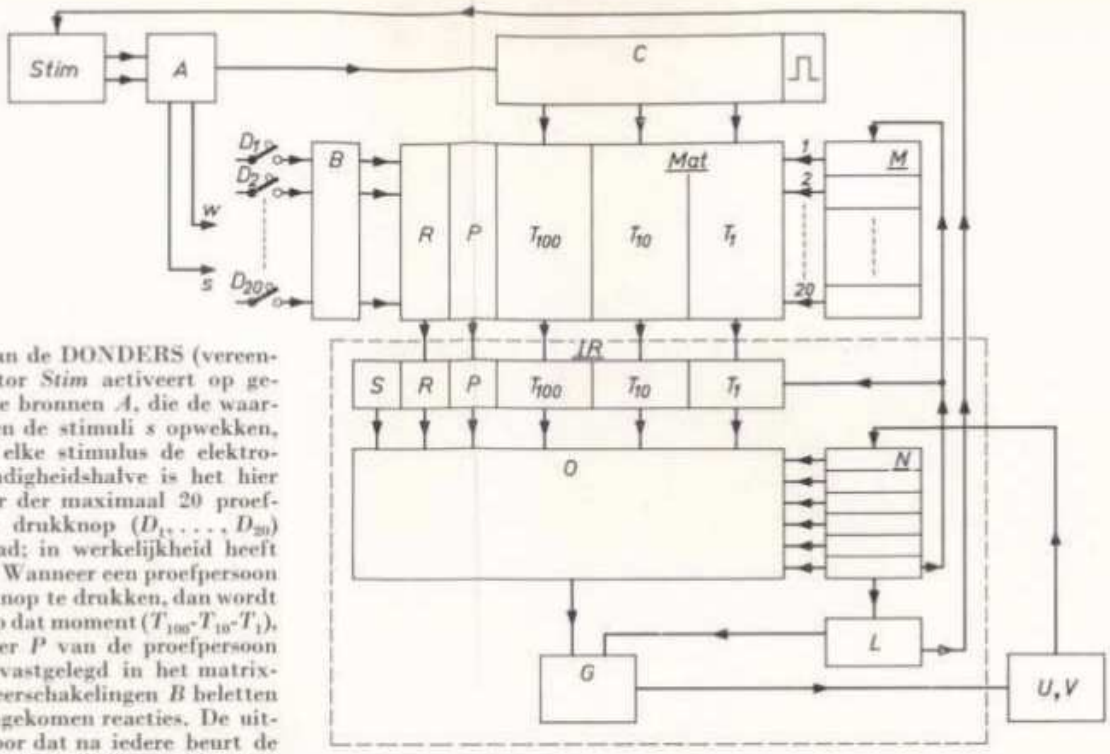


Fig. 1. Blokschema van de DONDERS (vereenvoudigd). De stimulator *Stim* activeert op gezette tijden de fysische bronnen *A*, die de waarschuwingssignalen *w* en de stimuli *s* opwekken, en start tegelijk met elke stimulus de elektronische klok *C*. Eenvoudigheidshalve is het hier voorgesteld alsof ieder der maximaal 20 proefpersonen slechts één drukknop ($D_1, \ldots, D_{20}$) tot zijn beschikking had; in werkelijkheid heeft ieder er maximaal 29. Wanneer een proefpersoon reageert door op zijn knop te drukken, dan wordt de stand van de klok op dat moment (T_{100}-T_{10}-T_1), samen met de volgletter *P* van de proefpersoon en de reactiekeus *R*, vastgelegd in het matrixgeheugen *Mat*. Blokkeerschakelingen *B* beletten het registreren van nagekomen reacties. De uitleesteller *M* zorgt ervoor dat na iedere beurt de in het geheugen geregistreerde informatie, met toevoeging van het codegetal S (dat de aard van de gebruikte stimulus aanduidt), in de juiste volgorde wordt overgebracht naar het tussenregister *IR*. Vandaar gaat de informatie via de uitvoerpoort *G* naar het uitschrijforgaan (pons *U* of elektrische schrijfmachine *V*). Daarbij bepaalt de uitschrijfteller *N*, welke van de zes grootheden van één boeking aan de beurt is. Door middel van de volgordeselector *O*, die uit 36 schakelaars bestaat, kan men de zes grootheden van elke boeking willekeurig permuteren. Het ponsen en/of uittikken van iedere boeking wordt aan de uitschrijfteller teruggemeld, wat deze één stap verder doet gaan. Na het passeren van elke complete boeking wist de uitschrijfteller het tussenregister schoon en meldt hij aan de uitleesteller dat de volgende boeking naar het register kan overgaan. Het blok *L* geeft aan pons en schrijfmachine het sein om op een nieuwe regel over te gaan en meldt wanneer het uitschrijven gereed is.

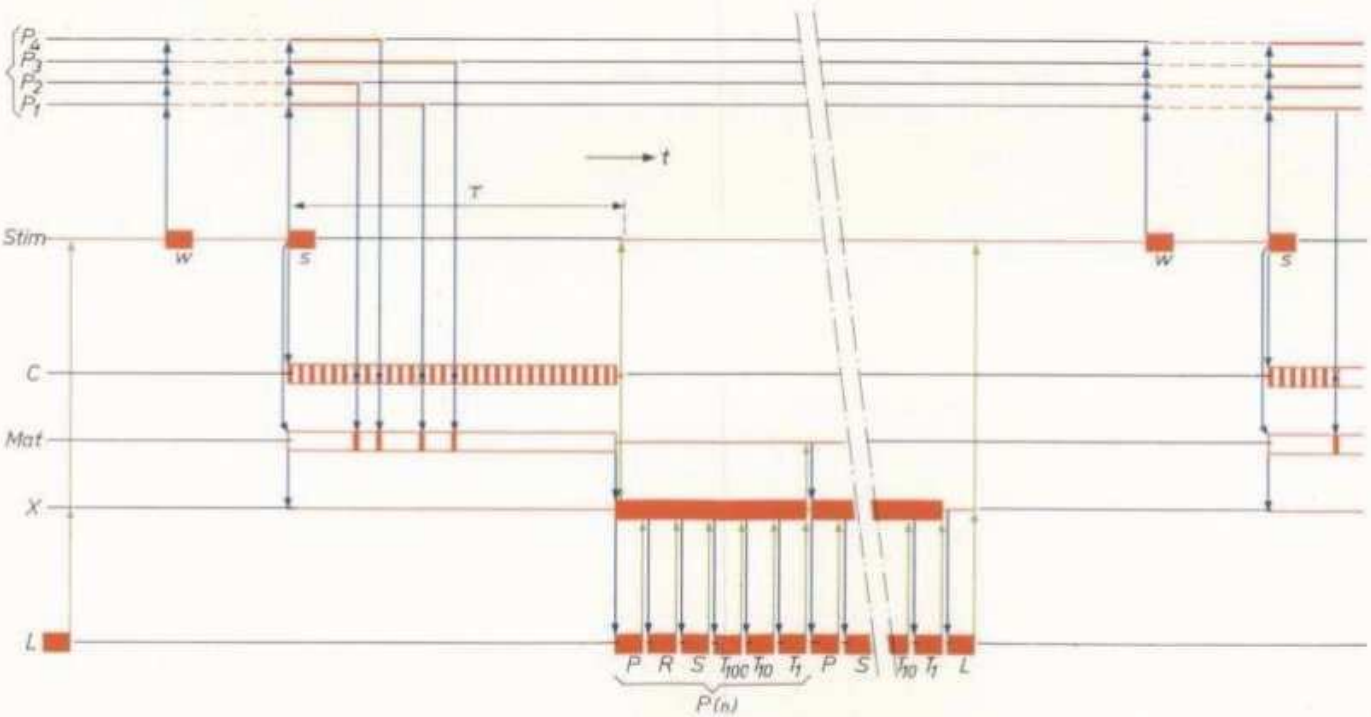


Fig. 2. Tijdvolgordediagram van de DONDERS. Het aantal proefpersonen is hier duidelijkheidshalve beperkt tot vier ($P_1, \ldots, P_4$). Zwarte lijnen duiden de rusttoestand aan, onderbroken rode lijnen de alerte faze, ononderbroken rode lijnen de actieve faze, blauwe pijlen de overbrenging van informatie, en groene pijlen terugmeldingen. De tijd *t* loopt van links naar rechts.

Een beurt begint wanneer de (reeds actieve) stimulator *Stim* het waarschuwingssein *w* geeft. De proefpersonen komen daardoor in de alerte faze. Even later luidt de stimulus *s* de actieve faze in, zowel voor de proefpersonen als voor de elektronische klok *C*, het matrixgeheugen *Mat* en het uitvoerorgaan *X* (met dit laatste bedoelen wij het complex binnen de gestippelde rechthoek in fig. 1). De proefpersonen reageren ieder na een eigen reactietijd, en de standen van de klok op deze momenten worden vastgelegd in het geheugen.

Zodra de klok aan het einde van de (instelbare) bedenktijd τ is gekomen, meldt hij dit aan de stimulator en het uitvoerorgaan. Het ponsen en/of uittikken van de boekingen neemt nu een aanvang. Van elke grootheid (*P*, *R*, enz.) wordt het ponsen of uittikken aan het uitvoerorgaan teruggemeld. Na afloop van een boeking meldt het uitvoerorgaan dit terug aan het matrixgeheugen. Aan het einde van de beurt (bij een nieuwe regel, *L*) geschiedt de terugmelding aan de stimulator. Deze begint na een kortere of langere wachttijd aan de volgende beurt.

Digitized in Heilo

11/14/2023

Het is duidelijk dat op de beschreven wijze in een beperkte tijd, zonder al te grote vermoeienis van de proefpersonen, een bijzonder groot aantal gegevens kan worden verzameld. Anderzijds moet de experimentator, wil hij met enige zekerheid conclusies kunnen trekken, ook over talrijke gegevens beschikken. Niet alleen immers wil hij in staat zijn, b.v. de statistiek van de reactietijden (eventueel per proefpersoon) te bepalen, doch ook de reactiekeus (aard van de reactie). Niet minder belangrijk dan de reactietijd zijn het aantal en de soort van de gemaakte fouten. Bovendien komen bij al dit soort proeven de onvermijdelijke — en op zichzelf bijzonder interessante — verschijnselen in het spel die teweeg worden gebracht door aanleren en door vermoeid raken van de proefpersonen, verschijnselen dus die op den duur hun prestaties vergroten resp. verkleinen. Dit maakt het in vele gevallen wenselijk, de 100 beurten te analyseren in klassen van 10 of 25 apart.

De snelle opeenvolging van de beurten — om de zes seconden in het voorbeeld van zoëven — is in de praktijk van groot voordeel. Lange wachttijden tussen de stimuli hebben namelijk bij dit soort eenvoudige reactieproeven een bijzonder ongunstige invloed op de proefpersonen: deze dreigen dan, ondanks alle voorafgegane motivering, de nodige aandacht voor de proef te verliezen.

Het blokschema en het tijdvolgordediagram van de DONDERS

Het hiërarchisch hoogste stuurorgaan van de DONDERS is de stimulator. Deze stelt zich na afloop van iedere beurt in op de volgende beurt, d.w.z. op de volgende stand van de programmaband in de ponsbandlezer. De hierin afgelezen stimulusgrootheid S wordt doorgegeven naar de fysische bron en genoteerd in het matrixgeheugen van de DONDERS. Kort nadat het waarschuwingssignaal is gegeven, wordt de fysische bron geactiveerd en tegelijk begint een elektronische klok te lopen, die stappen van 0,01 seconde maakt.

De proefpersonen nemen de stimulus waar en zodra zij reageren, wordt de stand van de klok (T_{100}-T_{10}-T_1) in code vastgelegd in de rij van het matrixgeheugen die aan de proefpersoon P is toebedeeld. Tevoren is op het bedieningspaneel een bedenktijd ingesteld, b.v. 2 seconden. Dit maakt dat de klok na afloop van de bedenktijd ophoudt te lopen en dat eventuele te late reacties niet worden geregistreerd. Bovendien luidt het stopzetten van de klok een nieuwe faze in, waarin het successief „uitlezen" van de rijen van het geheugen een aanvang neemt. De uitgelezen gegevens worden vastgelegd in een ponsband. Voor het geval dat minder dan 20 personen aan de proef deelnemen, wordt op het bedieningspaneel een schakelaar in de stand gezet die met hun aantal correspondeert. Dit voorkomt dat meer rijen van het geheugen worden uitgelezen dan er proefpersonen zijn. Is het uitlezen afgelopen, dan wordt dit gemeld aan de stimulator. Deze kan dan een nieuwe beurt inleiden.

Fig. 1 geeft het blokschema, *fig. 2* het tijdvolgordediagram van de DONDERS. Verschillende details worden aanstonds behandeld.

De informatieverwerking door de histometer

De experimentele gegevens worden beurt voor beurt, naar de volgorde van de proefpersonen, vastgelegd in de eerste ponsband, de zg. moederband. Zoals vermeld, kunnen ze bovendien worden uitgetikt door een elektrische schrijfmachine; ze leveren dan als eerste ruwe protocol het zg. moederblad (een voorbeeld hiervan vindt men in fig. 8).

Gesteld dat wij een diagram („palenveld", histogram; zie fig. 9) van de statistische verdeling der reactietijden wensen te bepalen. Dit diagram kan worden verkregen door het successief turven van de verschillende tijden (of klassen van tijden). Was iedere boeking niet in een ponsband, maar in een ponskaart vastgelegd, dan zou dit turven naar de drie criteria (T_{100}, T_{10}, T_1) op de bekende manier kunnen gebeuren door de kaarten te sorteren tot stapels. Men sorteert deze dan eerst naar het laatste van de drie cijfers, dus naar T_1; dit levert tien stapels kaarten, met T_1 = resp. 0, . . . , 9. Vervolgens voegt men deze stapels in de verkregen volgorde weer tot één stapel samen en sorteert deze naar T_{10}. Na de zo verkregen tien nieuwe stapels wederom tot één te hebben verenigd, sorteert men deze ten slotte naar T_{100}. Dit levert vier stapels. Legt men deze opeen, dan bevinden de kaarten zich daarin op volgorde naar opklimmende waarden van de tijd. Men kan nu gemakkelijk tellen, hoe vaak elke tijd erin voorkomt.

In ons geval echter zijn de gegevens niet beschikbaar in ponskaarten, maar in ponsband. De natuurlijke stapelbaarheid van kaarten zou bij band pas verkregen worden nadat de band in stukken was geknipt. Het doel is echter ook te bereiken door het maken van een dochterband, een kleindochterband, enz., waarbij de oorspronkelijke band intact blijft. Daartoe wordt de moederband, bestuurd door de stuurband van de histometer, verschillende malen afgetast. Bij de eerste ronde worden alleen de boekingen met $T_1 = 0$ gekopieerd, bij de tweede ronde alleen de boekingen met $T_1 = 1$ en ten slotte bij de tiende ronde de boekingen met $T_1 = 9$. De aldus verkregen dochterband bevat alle boekingen

o the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info

Voor de verschillende stimuli die aangeboden moeten kunnen worden, en de bijbehorende reacties wordt gedacht aan een aantal van omstreeks 30. In verband met de beschikbare code is de keus ten slotte gevallen op 29.

Het systeem moet zodanig zijn ingericht dat aan een niet te klein aantal proefpersonen gelijktijdig kan worden gemeten. Het maximumaantal is gesteld op 20.

Aan de proefpersonen moet voor iedere reactie een zekere bedenktijd ter beschikking kunnen worden gesteld, die instelbaar moet zijn op 1, op 2 en op 4 seconden.

Per persoon en per beurt moeten zes grootheden worden geregistreerd:

P, de volgletter van elk der 20 proefpersonen, van a tot t,

S, de aard van de aangeboden stimulus, van 1 tot 29,

R, de aard van de gegeven reactie (reactiekeus), van 1 tot 29 (dit getal geeft aan, op welke van de knoppen de proefpersoon heeft gedrukt),

T, de in drie cijfers gemeten reactietijd in seconden, waarvan de cijfers T_{100} (eenheden, 0-3), T_{10} (tienden, 0-9) en T_1 (honderdsten, 0-9) afzonderlijk moeten worden geregistreerd.

Van reacties die pas na afloop van de bedenktijd worden gegeven, moet de aard worden geregistreerd met het teken - en de tijd met 000.

Reageert iemand meer dan eens, dan mag alleen de eerste reactie worden geregistreerd.

Hoewel het registreren in een vaste volgorde geschiedt, wordt het wenselijk geacht — ter vergemakkelijking van het latere sorteerproces — dat toch steeds de volgletter van de desbetreffende proefpersoon erbij wordt afgedrukt. Om dezelfde reden wordt het nuttig geoordeeld dat bij de gegevens van elke proefpersoon telkens opnieuw de aard van de aangeboden stimulus wordt geregistreerd.

Technische richtlijnen

Per beurt worden de grootheden P, S, R, T_{100}, T_{10} en T_1 vastgelegd in een matrixgeheugen, bestaande uit magnetische ringkerntjes. Dit zestal grootheden heet een boeking.

Na afloop van de bedenktijd worden de boekingen van alle proefpersonen ter verdere verwerking overgebracht in ponsband. Desgewenst wordt deze informatie bovendien door een elektrisch bestuurde schrijfmachine op één regel uitgetikt; deze regel bevat maximaal $20 \times 6 = 120$ symbolen. Deze vastlegging in cijferschrift vormt een direct leesbaar protocol van de metingen, maar is uiteraard ongeschikt voor automatische verwerking.

De programmering van de totale proef — van b.v. 100 beurten — geschiedt door een stimulator, die bestuurd wordt volgens een in ponsband vastgelegd programma. De stimulator activeert tevens de fysische bron, die de (b.v. optische of akoestische) signalen voortbrengt welke als stimuli dienst moeten doen. Omgekeerd betekent dit dat de gebezigde fysische bronnen en het kiezen uit de verschillende signalen die ze kunnen voortbrengen, bestuurbaar moeten zijn door middel van ponsband. Een bijkomend voordeel hiervan is dat een bepaald in ponsband vastgelegd programma — b.v. van elkaar volgens toevalscijfers opvolgende stimuli — kan worden gebruikt voor signalen van zeer verschillende aard: nu eens voor letters, dan voor kleuren, dan weer voor tonen van verschillende hoogte, enz.

De automatische verwerking ten slotte geschiedt hetzij door een elektronisch apparaat, de histometer, waarvan het verwerkingsprogramma eveneens in ponsband is vastgelegd, hetzij door een van de elektronische rekenmachines van Philips' Rekencentrum. Vooral in het beginstadium van ieder onderzoek blijkt grote behoefte te bestaan aan verwerking onmiddellijk ter plaatse, reden waarom dan meestal de voorkeur wordt gegeven aan de histometer.

Als code voor programmering en boeking is universeel een binaire code met zeven eenheden gebruikt. Elke groep van zeven binaire eenheden vormt een zg. heptade.

De inrichting van een proef

Onder proef verstaan wij hier het totale experiment aan een aantal proefpersonen. Een proef bestaat uit een aantal series, een serie uit de opeenvolging van b.v. 100 beurten. Voor de proefpersonen bestaat een beurt achtereenvolgens uit het wachten op een waarschuwingssignaal, het waarnemen van de stimulus en het reageren op de stimulus door b.v. een bepaalde knop in te drukken.

Als de waarschuwingstijd, de bedenktijd en de tijd die nodig is voor het registreren van de boeking in de ponsband, elk b.v. 2 seconden duren, bedraagt de totale cyclustijd per beurt 6 seconden. Een proef van 100 beurten duurt dan 600 seconden = 10 minuten. In deze tijd hebben de 20 personen ieder 100 maal gereageerd. Aangezien iedere individuele reactie wordt gekenschetst door de zes grootheden P, S, R, T_{100}, T_{10} en T_1, bevat de ponsband na afloop $20 \times 100 \times 6 = 12\,000$ heptaden; deze nemen een lengte van 30 m in beslag. De registratietijd van 2 seconden volgt uit het aantal van 120 symbolen per proef en de ponssnelheid, die 60 heptaden per seconde bedraagt.

Digitized in Heiloo

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van de moederband, opklimmend gesorteerd naar de tien waarden van T_1. Het procédé wordt nu herhaald met de dochterband en levert dan een kleindochterband, waarin de boekingen tevens gesorteerd zijn naar de tien waarden van T_{10}. Ten slotte sorteert men nog eens, in een achterkleindochterband, naar de vier waarden van T_{100}.

Het bovenstaande lichten wij toe met een eenvoudig voorbeeld. Gesteld dat in de moederband (M) de volgende reeks getallen staat:

M: 23 30 27 31 35 41 28 32 29 27 36 29 36 36 39 31.

Om deze getallen in opklimmende volgorde te rangschikken, vervaardigen wij eerst in tien ronden een dochterband, waarin bij de eerste ronde alleen die getallen uit M worden overgeponst welke op een 0 eindigen, bij de tweede ronde alleen de op een 1 eindigende, enz., tot bij de tiende ronde alleen de op een 9 eindigende worden overgenomen. In deze dochterband (D_1) is dan komen te staan:

D_1: 30 31 41 31 32 23 35 36 36 36 27 27 28 29 29 39.

Vervolgens wordt van D_1 in tien ronden een kleindochterband (D_2) gemaakt, waarin achtereenvolgens van D_1 alleen de getallen worden overgenomen die met een 0 beginnen, dan de met een 1 beginnende (deze beide categorieën ontbreken hier), vervolgens de met een 2 beginnende enz.. Het resultaat is als volgt:

D_2: 23 27 27 28 29 29 30 31 31 32 35 36 36 36 39 41.

Hiermee is de gevraagde rangschikking verkregen.

Opgemerkt zij dat men niet tot het goede resultaat zou zijn gekomen als men eerst naar het eerste en dan naar het tweede cijfer had gerangschikt. In de dochterband was dan komen te staan:

D_1: 23 27 28 29 27 29 30 31 35 32 36 36 36 39 31 41,

en op de kleindochterband:

D_2: 30 31 31 41 32 23 35 36 36 36 27 27 28 29 29 39.

Deze volgorde is niet juist.

Deze methode van sorteren hebben wij hier beschreven voor het classificeren van reactietijden. Ze is echter universeel en kan dus evenzeer worden toegepast voor het classificeren van proefpersonen, stimuli en reactiekeuzen, en ook van combinaties van deze criteria. Het aantal noodzakelijke generaties van dochterbanden, kleindochterbanden, enz., blijft in het algemeen tot enkele beperkt. Een geconsolideerd resultaat van waarnemingen, wil het significante conclusies mogelijk maken, verbiedt namelijk — bijna per definitie! — het indelen in een groot aantal klassen.

De tijden T_{10} en T_1 zijn als volgt gecodeerd:

0 = 10000,	5 = 00101,
1 = 10001,	6 = 00110,
2 = 10010,	7 = 00111,
3 = 10011,	8 = 01000,
4 = 10100,	9 = 01001.

Dit is de gewone binaire code (die zich eenvoudig tot optelling leent), voorafgegaan door een 1 voor de waarden 0, . . . , 4, en door een 0 voor de waarden 5, . . . , 9.

Deze code stelt ons in staat, ook naar bredere tijdklassen dan de minimale te sorteren. Bij het sorteren naar klassen van 0,01 seconde vallen deze klassen natuurlijk samen met de gemeten waarde. De tijdcode moet dan volledig worden uitgelezen. Het sorteren naar klassen van 0,02 seconde geschiedt door het weglaten van de laatste binaire eenheid, en het sorteren naar klassen van 0,05 seconde door het weglaten van alle binaire eenheden behalve de eerste. Het sorteren naar klassen van 0,1 seconde gebeurt door de T_1-code geheel over te slaan, enz.

Voor het uittikken van een dochter- of kleindochterband in de een of andere geconsolideerde vorm (histogram, tabel) is het wenselijk, teksten of bijschriften toe te voegen. Daarin is bij de codering op de volgende wijze voorzien. Elk volledig teken in de ponsband bestaat uit een zevental gaten (heptade). Zes hiervan dragen letter- of cijferinformatie. Heeft deze informatie betrekking op de uitkomsten van het experiment, dan wordt een zevende gat geponst. Is daarentegen de informatie „operationeel", dan wordt ze als zodanig gekenmerkt door het achterwege laten van het zevende gat. (Onder operationele informatie verstaan wij zowel de informatie die dient om de histometer te besturen als de informatie die dient om naderhand het uitgewerkte resultaat te voorzien van toelichtende tekst.)

Nadere bijzonderheden

De stimulator

De voortgang van een proef wordt bestuurd door de stimulator. Deze is afgebeeld in *fig. 3*. Voor de tijdsindeling van een beurt wordt gebruik gemaakt van een elektronische telschakeling, die per beurt de getallen van 1 tot maximaal 10 000 aftelt in stappen van b.v. 0,01 seconde. Door middel van een schakelaar kan men tevoren enige van deze getallen kiezen als signaalgetal. Bij het passeren van elk signaalgetal geeft de telschakeling een signaal (elektrische impuls), waardoor b.v. het waarschuwingslicht wordt ontstoken, de stimulus gegeven, enz. De telschakeling keert naar de beginstand terug zodra de registratie-apparatuur meldt dat ze met het verwerken van de gegevens klaar is.

De fysische bronnen

De fysische bronnen, die de stimuli leveren, kunnen allerlei gedaanten hebben. Een van de eenvoudigste is die van b.v. tien lampjes, die door relais één voor één of in bepaalde combinaties worden in- en uitgeschakeld. Ook luidsprekers, hoofdtelefoons, enz. kunnen als fysische bron dienst doen.

Bij experimenten over de herkenbaarheid van letters wordt als fysische bron een zg. letterprojector gebruikt. Deze bestaat uit een lichtbron, een projec-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

tiesysteem en een wiel; in het wiel bevinden zich diapositieven van de letters die op herkenbaarheid onderzocht moeten worden. De stimulator bepaalt de stand van het wiel.

De matrixgeheugens

Voor het registreren van de reactietijden is voor ieder van de 20 proefpersonen een register aanwezig bestaande uit ringetjes van magnetisch materiaal [2]). In dit register wordt de reactietijd vastgelegd volgens het coïncidentieprincipe. Zodra een proefpersoon op een knop drukt, gaat door een draad die door alle ringetjes van zijn register is gestoken, een stroom $+\frac{1}{2}I$ lopen ($+I$ noemen wij de stroom die nodig is om de richting waarin de ringetjes gemagnetiseerd waren, om te keren). Alleen die ringetjes die door de stand van de elektronische klok worden aangewezen, krijgen via een tweede draad er nog een magnetiseringsstroom $+\frac{1}{2}I$ bij, zodat uitsluitend in deze ringetjes de magnetisatie wordt omgekeerd. Daarmee is de reactietijd geregistreerd. In *fig. 4* is een van de matrixgeheugens van de DONDERS afgebeeld.

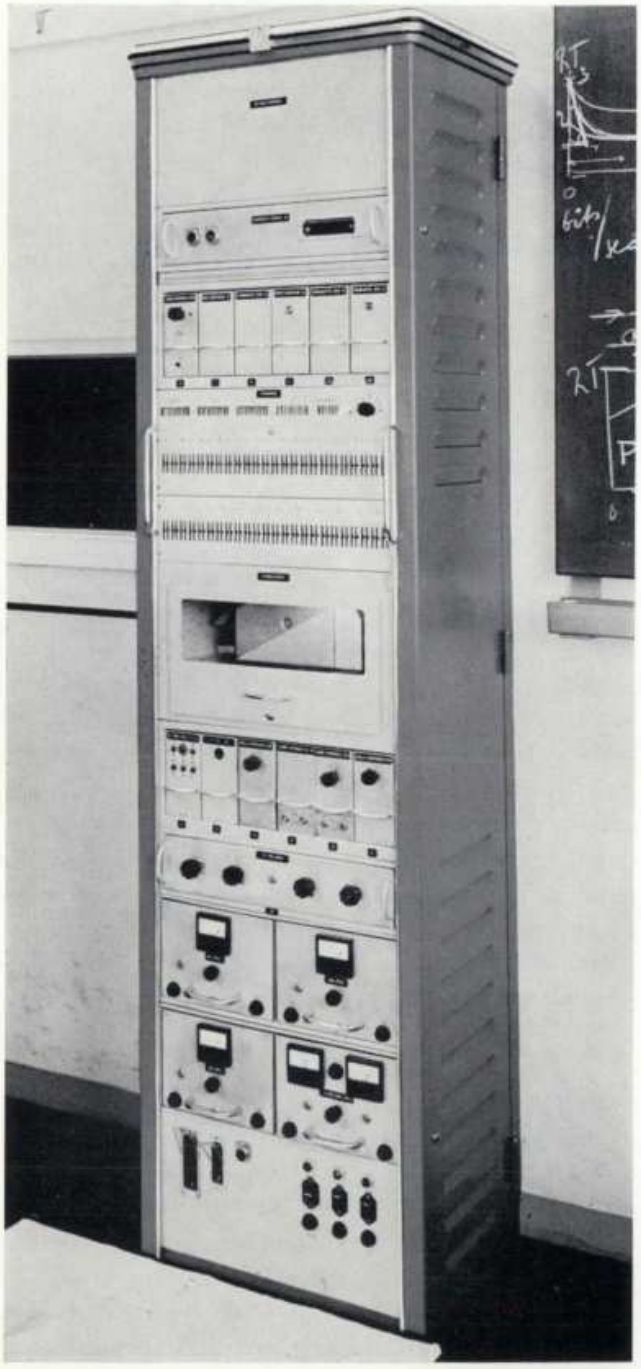


Fig. 3. De stimulator, die de voortgang van een proef regelt.

Het gebeurt wel eens dat een proefpersoon bij vergissing een tweede maal op een knop drukt, of dat hij weifelend drukt, waardoor enige malen contact wordt gemaakt. Zulke nakomende reacties mogen niet worden geregistreerd. Hierin is op de volgende wijze voorzien. Bij het drukken op één van zijn maximaal 29 knoppen sluit de proefpersoon één van 29 stroomketens. In de gemeenschappelijke terugleiding is een transistorschakeling opgenomen. Wanneer de reactietijd (de stand van de klok bij het eerste sluiten van het drukcontact) moet worden geregistreerd, wordt de transistor in de geleidende toestand gebracht. Door de eerste reactie echter van de proefpersoon wordt de transistorschakeling geblokkeerd; de terugleiding is dan onderbroken, zodat registratie van eventuele nagekomen reacties onmogelijk is. Pas wanneer alle gegevens betreffende de in gang zijnde beurt zijn geregistreerd en de volgende beurt begint, wordt de transistorschakeling gedeblokkeerd en is de weg voor registratie van de eerstvolgende reactietijd dus weer open. In *fig. 5* is de werking nader toegelicht. De 20 blokkeerschakelingen zijn in fig. 1 samengevat in blok *B*.

Het „uitlezen" van de matrixgeheugens

Wanneer de bedenktijd is verstreken, moet de informatie die in het geheugen geregistreerd is, in een bepaalde volgorde worden „uitgelezen", d.w.z.: er moet worden nagegaan, in welke richting elk ringetje is gemagnetiseerd. Van deze richting hangt het af of in de ponsband, telkens op de plaats die aan het ringetje is toegevoegd, al dan niet een gat moet worden geponst.

Het uitlezen is in grove trekken als volgt georganiseerd. De registers van de proefpersonen worden steeds in een vaste volgorde uitgelezen. Dit gebeurt door bemiddeling van de uitleesteller (blok *M* in fig. 1), bestaande uit een magnetische teller die zoveel standen heeft als er proefpersonen zijn. Per proefpersoon omvat de uit te lezen informatie de grootheden T_{100}, T_{10}, T_1 en R. Bovendien zijn er de

[2]) Zie b.v. Philips techn. T. **20**, 182, 1958.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

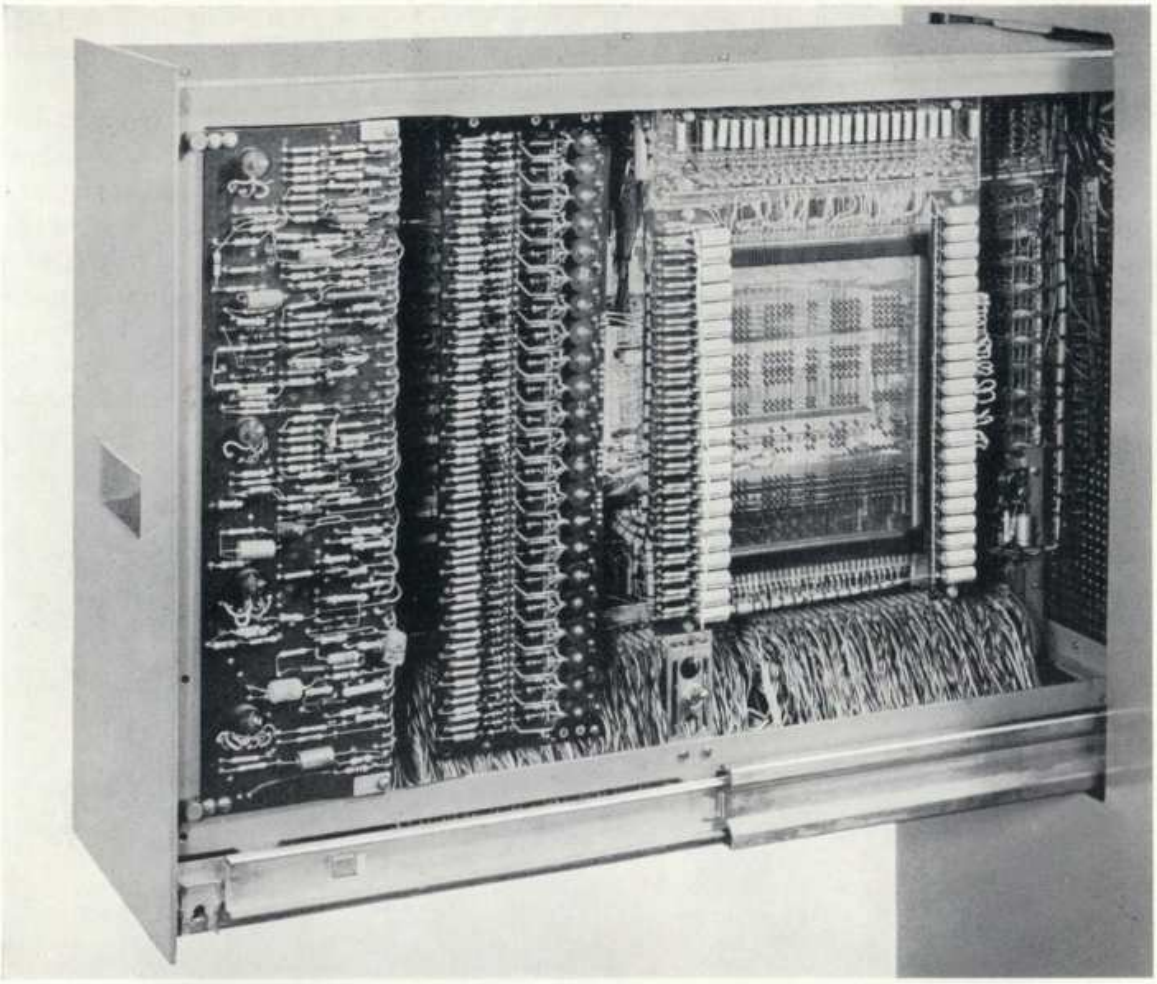


Fig. 4. De elektrische schakeling achter het instellingspaneel van de operateur (zie fig. 7) bevindt zich in een lade, die hier opengetrokken is. Op het doorzichtige paneel rechts van het midden zijn de ringkerntjes van het matrixgeheugen te zien.

informaties S en P; per beurt is S voor alle proefpersonen dezelfde, en voor een zelfde proefpersoon is P bij alle beurten dezelfde. De zes heptaden ($T_{100}, \ldots, P$) worden geregistreerd in een tussengeheugen (IR in fig. 1). Een uitschrijfteller (een reeks van zes flip-flops, blok N in fig. 1) maakt dat telkens één boeking via een poortschakeling (G in fig. 1) wordt doorgegeven naar het uitschrijforgaan (pons of schrijfmachine of beide). Elke heptade, b.v. T_{100}, blijft aan het uitvoerorgaan aangeboden totdat van dit orgaan een terugmelding is ontvangen en verwerkt. Voor de pons wil dit zeggen dat de ponsstem-

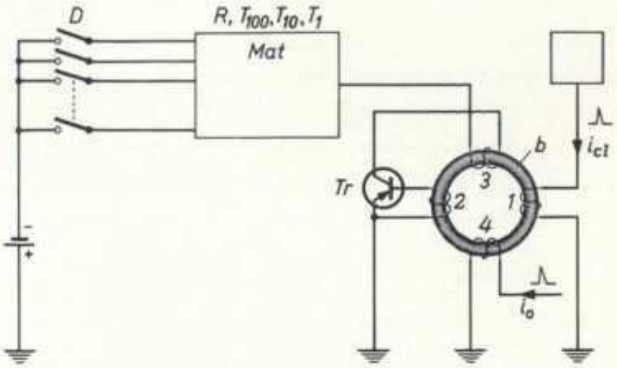


Fig. 5. Schakeling die, wanneer een proefpersoon meer dan één maal reageert, het registreren van de nagekomen reacties verhindert en tevens het matrixgeheugen blokkeert tijdens het verspringen van de elektronische klok.

Op de ogenblikken waarop de klok een vaste stand heeft, loopt één impuls i_{cl} door winding *1* op het ringkerntje *b* (de blokkeerring). De impuls induceert in winding *2* een stroomstoot. Deze dient als basisstroom voor een transistor *Tr*. Reageert de betrokken proefpersoon, door op één van zijn (maximaal 29) knoppen *D* te drukken, dan loopt via de collector een stroom door de matrix *Mat* en door winding *3* op de blokkeerring *b*. Deze stroom keert de in de ring heersende magnetisatie van richting om. Dit betekent dat de reactiekeus *R* en de reactietijd T_{100}-T_{10}-T_1 van de proefpersoon in de matrix zijn geregistreerd en dat de magnetisatie van ring *b* in de richting waarin deze nu is gemagnetiseerd, niet sterker kan worden. Er kan dus geen basisstroom meer geïnduceerd worden, zodat door de transistor geen collectorstroom meer kan lopen. De matrix is dus pas opnieuw in staat tot het registreren van een volgende reactie nadat de magnetisatie van ring *b*, door middel van een stroomstoot i_0 door de deblokkeerwinding *4*, in de oorspronkelijke richting is teruggebracht. De stroomstoot i_0 is afkomstig van blok *L* (fig. 1) en wordt gegeven tijdens het uitlezen.

Per proefpersoon is deze blokkeerschakeling één maal aanwezig. De 20 blokkeerschakelingen zijn in fig. 1 aangeduid met *B*.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

pel één slag heeft gemaakt en dat de band één stap is opgeschoven. Wat de schrijfmachine betreft, deze geeft een terugmelding wanneer een van de typehamers één slag heeft gemaakt en in de ruststand is teruggekeerd. Na de terugmelding is er dus zekerheid dat de heptade is verwerkt.

De uitschrijfteller komt nu één stand verder, waardoor de volgende heptade, b.v. T_{10}, aan het uitvoerorgaan wordt aangeboden. Op deze wijze worden achtereenvolgens alle zes heptaden naar de pons en/of de schrijfmachine overgebracht. Daarna wordt het hele proces herhaald voor de volgende proefpersoon.

enz. Het aantal en de plaatsing van de knoppen en lampjes worden gekozen in overeenstemming met de proef die men wil nemen. 32-aderige kabels verbinden de panelen met de DONDERS, die in een aangrenzende kamer is opgesteld. Eenrichtingsramen in de tussenmuur stellen de operateur, die de DONDERS bedient, in staat te zien of in het proeflokaal alles naar wens verloopt (*fig. 7*), terwijl hij voor de proefpersonen nagenoeg onzichtbaar blijft. Door deze ramen heeft de operateur tevens visueel contact met de proefleider in het proeflokaal. Bovendien hebben deze beiden een communicatiesysteem tot hun beschikking.

Fig. 6. Kijkje in het proeflokaal. Men ziet zes van de 20 lessenaars voor de proefpersonen. Op de achtergrond de plaats voor de proefleider. Links boven twee optische stimulusbronnen, bestaande uit lampjes in verschillende configuraties (duidelijker te zien op de foto op blz. 365 in dit nummer).

Zoals gezegd, kan men de volgorde waarin de zes heptaden aan het uitvoerorgaan worden doorgegeven, nog kiezen. 36 schakelaars (in fig. 1 voorgesteld door het blok *O*) maken namelijk deze heptaden permutabel. Dat iedere gewenste volgorde kan worden ingesteld, is van belang voor een betere verwerking van de ponsband door de histometer. Bovendien zijn er nog zes schakelaars waarmee ieder van de zes heptaden kan worden weggelaten.

De lokaliteiten

De proefpersonen nemen plaats in het proeflokaal (*fig. 6*), waarin 20 lessenaars en stoelen zijn geplaatst. Op elke lessenaar bevindt zich een uitwisselbaar paneel met drukknoppen en lampjes en eventueel een waarschuwingslampje, één of meer stimuluslampjes,

De bediening van de DONDERS

De bediening van de DONDERS vergt per proef (deels vóór, deels tijdens de proef) een aantal handelingen, die echter weinig tijd in beslag nemen.

Voordat de proef begint, moet de operateur de voedingsapparatuur op het net schakelen, een aantal voedingsspanningen controleren, de uitleesteller instellen op het aantal proefpersonen dat zal deelnemen, kiezen welk uitvoerorgaan zal worden gebruikt (pons, schrijfmachine of beide), nagaan welke van de grootheden P, S, R, T_{100}, T_{10} en T_1 nodig zijn en in welke volgorde ze moeten worden geregistreerd, de bedenktijd instellen en de wijze van stimuleren kiezen. (De stimulusbronnen kunnen desgewenst met de hand worden bestuurd, waarbij de beurten in een vrij tempo op elkaar volgen.) De bedienings-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

knoppen voor deze instellingen zijn ondergebracht op een instellingspaneel links op de lessenaar van de operateur (fig. 7).

Recht voor zich heeft de operateur het voortgangspaneel, dat een groot aantal controlelampjes bevat. Hierop kan hij o.a. aflezen, in welke faze van een beurt de apparatuur zich bevindt (start, waarschuwing, presentatie van de stimuli, einde van de bedenktijd, uitschrijven) en welke personen hebben gereageerd. Bovendien toont een rij lampjes, welke stimulus is aangeboden. Een elektronische teller houdt het aantal afgewerkte beurten bij en stopt de proef zodra het tevoren ingestelde aantal is bereikt. Een indicator laat zien, hoeveel beurten nog verwerkt moeten worden. Door middel van een stopknop kan de operateur de proef onderbreken wanneer onverwachte omstandigheden daartoe aanleiding geven.

Een duplicaat van het voortgangspaneel is ondergebracht in de lessenaar van de proefleider in het proeflokaal (fig. 6).

Aan zijn rechterzijde heeft de operateur het controlepaneel (fig. 7). Hierop zijn toetsen aangebracht waarmee hij met de hand de stimuli kan besturen. Voorts bevat dit paneel een volledige reeks drukknoppen die analoog met de reactieknoppen van de proefpersonen zijn, zodat de operateur in staat is, zelf de uitwerking van het bespelen van deze knoppen te constateren. Ten slotte nog biedt het controlepaneel ruimte voor toetsen die dienst doen bij het zoeken naar eventuele storingen.

Fig. 7. Lessenaar van de operateur, met doorkijk naar het proeflokaal. In deze lessenaar is de DONDERS gemonteerd. Links heeft de operateur het instellingspaneel, midden voor zich het voortgangspaneel, rechts het controlepaneel. Een duplicaat van het voortgangspaneel bevindt zich op de lessenaar van de proefleider (fig. 6). Geheel rechts is een deel van de stimulator te zien.

Voorbeeld van een reactie-experiment

Omstandigheden van de proef

Tot slot geven wij als voorbeeld een beschrijving en de resultaten van een proef waarbij tien stimuli werden aangeboden aan tien proefpersonen, die elk tien reacties konden geven.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

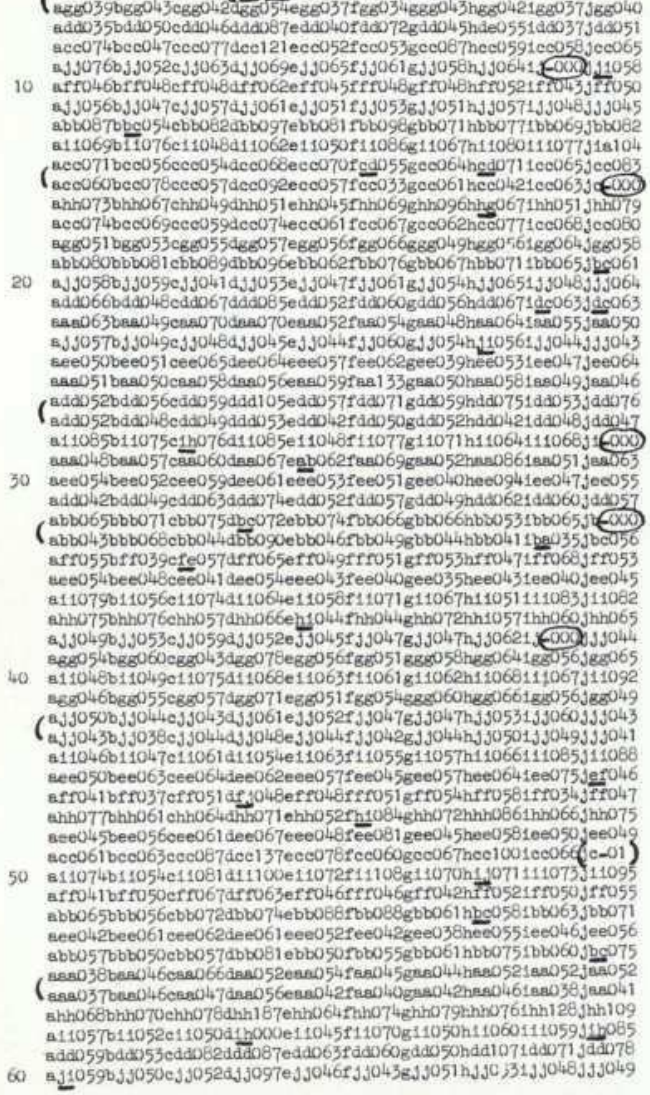


Fig. 8. Deel van een moederblad voor serie 1. Zestig regels geven de resultaten van 60 der 100 beurten van tien personen *a-j* weer. Per persoon is een zestal symbolen (boeking) afgedrukt in de volgorde P-S-R-T_{100}-T_{10}-T_1. Zo betekent b.v. de rechthoekig omstreepte boeking in de vijfde beurt dat proefpersoon *d* op stimulus g heeft gereageerd met reactie *f* in 1,07 seconde. Foute reacties zijn onderstreept, te late reacties (boeking -000) omrand. De boeking (c-01) in de 49ste beurt is een fout van de DONDERS. Opvolgingen van gelijke stimuli zijn links aangeduid met een haakje. Men lette op de meestal kortere reactietijd bij een herhaalde stimulus.

De omstandigheden waren als volgt. Ieder van de proefpersonen beschikte over een paneel met tien toetsen, die zo waren geplaatst dat hij de vingertoppen er zonder inspanning op kon leggen (fig. 6). De proefpersonen hadden de blik gevestigd op een aan de wand vóór hen bevestigd bord met tien lampjes. De stimuli bestonden uit het aanflitsen van één lampje. De configuratie van de lampjes was dezelfde als die van de toetsen; de toevoeging van de tien lampjes *a-j* aan de tien toetsen *a-j* was dus overduidelijk.

Na een oefenserie van 50 stimuli werden vier series van 100 stimuli aangeboden. De duur van elke stimulus was 1 seconde, de bedenktijd 2 seconden, de cyclusduur 3 seconden. Iedere serie duurde dus 5 minuten, waarna 1 minuut pauze werd gegeven. Er was een waarschuwingssignaal per serie, doch niet per beurt. De totale proef duurde een half uur, waarna de proefpersonen hun bevindingen meldden en bespraken.

Resultaten

Fig. 8 toont een deel van het moederblad van de eerste serie. Iedere regel stelt de gegevens van de tien proefpersonen voor één beurt voor.

Fig. 9 geeft het histogram der reactietijden van de eerste serie weer, gesorteerd naar tijdklassen van 0,05 seconde. Voor iedere klasse is eerst het aantal goede reacties afgeturfd met het symbool 0, daarna dat der foute reacties met X. Hierdoor ontstaat automatisch het palenveld (histogram), waaraan de histometer zijn naam ontleent.

Een minder aanschouwelijke doch meer compacte wijze van registreren geeft het tijd-stimulusdia-

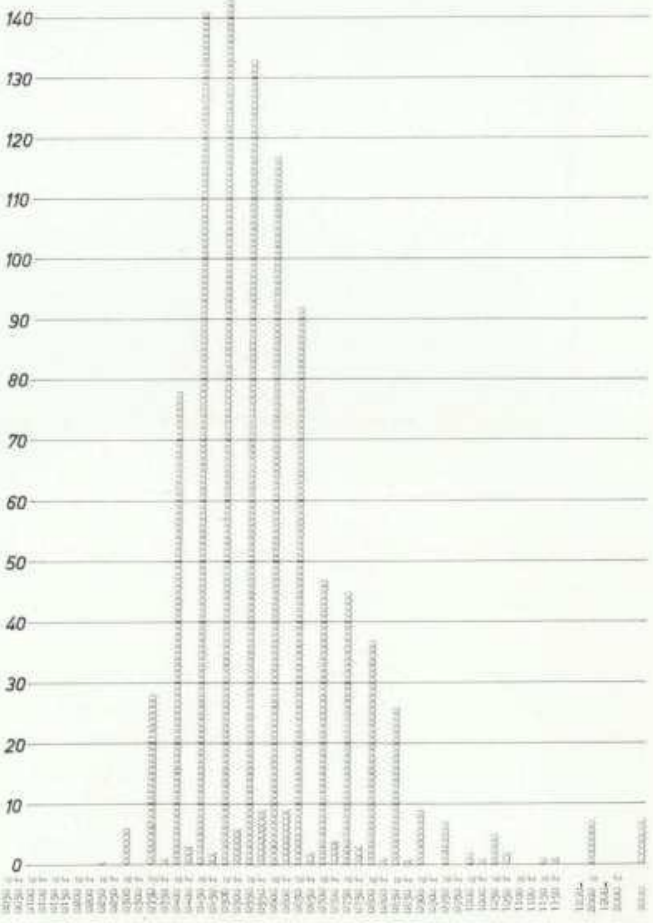


Fig. 9. Histogram van de reactietijden voor serie 1. In tijdklassen van 50 ms zijn eerst de goede resultaten (g) uitgetikt met het symbool 0, daarna de foute reacties (f) met het symbool X. De verdelingskromme is het resultaat van 100 metingen aan tien proefpersonen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

gram (*fig. 10*). Hierin zijn weergegeven de aantallen per tijdklasse, bovendien verdeeld over de tien stimuli. Het is duidelijk te zien dat voor de stimuli *b*, *i*, *c* en *h* (corresponderende met de ringvingers en middenvingers) de verdeling zich verplaatst naar langere reactietijden.

Stimulus	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
Reactietijd in millisec.										
0100	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
0200	---	---	---	---	---	001	---	001	001	---
0300	025	012	016	017	049	050	020	020	011	022
0400	133	043	029	093	150	166	111	051	044	162
0500	138	086	105	147	143	115	164	090	107	149
0600	074	104	103	088	049	044	075	096	108	045
0700	017	071	071	032	009	008	016	084	066	015
0800	007	052	042	011	002	004	003	032	045	003
0900	001	020	014	001	001	---	001	011	012	001
1000	---	006	007	003	---	001	001	005	007	---
1100	---	003	004	---	---	---	---	---	001	---
1200	---	---	001	---	---	---	---	002	---	---
1300	001	001	001	---	---	---	---	---	---	---
1400	---	---	---	---	---	001	---	002	---	---
1500	---	---	001	---	---	---	---	001	---	---
1600	---	001	---	---	---	---	---	001	---	---
1700	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
1800	---	---	---	---	---	---	---	001	---	---
1900	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
2000	---	001	001	004	---	---	001	---	002	002

Fig. 10. Tijd-stimulusdiagram voor een volledige reactieproef. De histometer heeft het totale aantal van 400 metingen aan tien proefpersonen voor ieder der tien stimuli *a-j* gesorteerd in tijdklassen van 100 ms. Het verschil in de verdeling der aantallen over de tijd voor de verschillende stimuli komt duidelijk tot uitdrukking.

De uit de histogrammen verkregen gemiddelde reactietijden $\bar{t}$ en foutenpercentages *f* voor de totale proef zijn weergegeven in *fig. 11*. In de duidelijke onderlinge verschillen spelen twee effecten door elkaar heen, namelijk de onderscheidbaarheid der stimuli (die voor de randstimuli beter is dan voor de middenstimuli) en de bedrevenheid der vingers. De goede resultaten zowel naar reactietijd als foutenpercentage voor de pinken en hun stimuli (*a* en *j*) zijn vooral op de eerste oorzaak terug te voeren, die voor de wijsvingers en hun stimuli (*d* en *g*) vooral op de tweede oorzaak.

In *fig. 12* geven wij de verwisselingsmatrix, waarin het aantal keren staat weergegeven dat op iedere stimulus met iedere reactie werd gereageerd. De diagonaaltermen geven de aantallen juiste reacties weer, de extradiagonaaltermen de aantallen foute reacties. Duidelijk is te zien dat de meeste fouten bestaan in het reageren door middel van de buurtoetsen. Het is opmerkelijk dat de fouten der ringvingers en middenvingers een asymmetrie vertonen: die van de ringvingerstimulus vooral naar de middenvinger, die van de middenvingerstimulus vooral naar de wijsvinger toe.

Bepaalt men voor iedere stimulus en iedere persoon de gemiddelde reactietijd en de standaardafwijking, dan lopen deze waarden zowel naar personen als naar stimuli en naar stimuli per persoon ca.

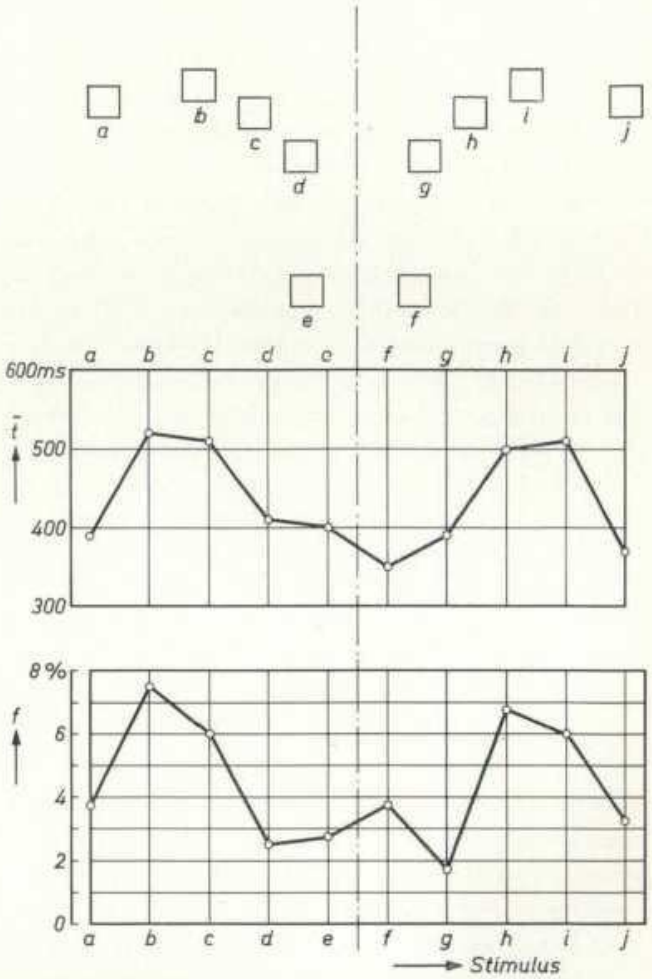


Fig 11. De gemiddelde reactietijd $\bar{t}$ en het foutenpercentage *f* bij de verschillende stimuli *a-j*, voor de totale proef. Bovenaan: de configuratie der stimuluslampjes (tevens die der toetsen).

Voor de stimuli die met de ringvingers (*b* en *i*) en de middenvingers (*c* en *h*) corresponderen, is zowel de reactietijd als het foutenpercentage duidelijk groter dan voor de andere stimuli.

Stimulus	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
Reactie										
a	582	004	---	---	---	---	---	---	002	---
b	015	566	008	---	---	001	---	---	---	---
c	---	025	568	003	---	---	001	---	---	---
d	---	001	016	582	001	001	---	---	---	---
e	---	---	---	035	589	011	001	---	---	---
f	---	---	---	---	010	580	001	---	---	---
g	---	---	---	002	---	001	585	021	004	---
h	---	---	---	---	---	---	004	572	014	001
i	---	---	---	---	---	---	---	005	579	012
j	---	---	---	---	---	001	---	001	004	585
Totaal fout	015	030	024	010	011	015	007	027	024	013

Fig. 12. Verwisselingsmatrix voor de totale proef. De histometer heeft nu gesorteerd naar de reacties waarmee op een bepaalde stimulus werd gereageerd.

De diagonaaltermen geven de aantallen juiste reacties weer, de extradiagonaaltermen de aantallen foute reacties. Te late reacties zijn niet meegeteld. Opvallend is de neiging om in plaats van de ringvinger (*b* en *i*) de middenvinger (*c* en *h*) te gebruiken, en in plaats van de middenvinger de wijsvinger (*d* en *g*).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

25% uiteen. De verhouding van de standaardafwijking tot de gemiddelde reactietijd blijkt voor acht van de tien proefpersonen een constante te zijn, die 0,19 bedraagt. Voor de proefpersonen *b* en *i* echter is deze verhouding 0,15 resp. 0,17.

Ook is het interessant dat wanneer bij toeval twee gelijke stimuli elkaar opvolgen — hetgeen in 10% der beurten het geval was — de reactietijd voor de herhaalde stimulus ca. 15% korter was dan voor de eerste stimulus. Blijkbaar zit deze eerdere reactie de proefpersoon nog „in de vingers". Dit is op het oog reeds te zien op het moederblad (fig. 8) bij de met een haakje aangeduide beurten.

In de histometrie naar de individuele proefpersonen komen aanmerkelijke verschillen voor, zowel in de gemiddelde reactietijd als in de vorm van de verdelingskromme en in het aantal en de soort van de gemaakte fouten. Ook tussen de vier series doen zich significante verschillen voor.

Bovenvermelde resultaten illustreren, hoezeer het verkrijgen van statistisch betrouwbare resultaten over de talloze aspecten die in een totale reactieproef een rol spelen, van het grootste belang is voor het toetsen van theorieën over de wijze waarop de uiteindelijke reactie bij de mens tot stand komt.

Het verwerken van de genoemde 4000 waarnemingen, die binnen een half uur door tien proefpersonen werden verricht, tot vier moederbladen en een 30-tal histogrammen zou zonder automatische middelen vele maanden hebben gevergd. Met de histometer als eenvoudig sorteerapparaat duurde dit alles, met inbegrip van het maken van de stuurbanden en dochterbanden, een week. Dit is weliswaar nog lang ten opzichte van de duur van de proef, doch — en daarom gaat het in wezen — kort ten opzichte van de tijd die de wetenschappelijke onderzoeker besteedt aan de interpretatie van de aldus verwerkte resultaten.

Een rekenmachine zou het rekenwerk aanmerkelijk sneller en meer flexibel kunnen verrichten, maar ook hier moet de tijd die effectief nodig is voor het gereedmaken van de van geval tot geval wisselende programma's, niet worden onderschat.

Voor de wetenschappelijke onderzoeker blijft het van het grootste belang, zo spoedig mogelijk over verwerkte meetresultaten te beschikken, opdat hij de conclusies hieruit kan benutten voor de verdere gang van het onderzoek.

Tot de realisering van het totale project DONDERS hebben in het bijzonder bijgedragen: G.J.J. Moonen voor de elektrische ontwikkeling, D.J.H. Admiraal en J.C. Valbracht voor de elektrische aanpassing, B. Lopes Cardozo voor de histometrie, F.F. Leopold voor de procedure en voor de ergonomische eisen aan de lessenaar en de panelen, en C.J.F.P. van den Bosch *) en W. K. Waisvisz *) voor de industriële vormgeving.

*) Philips' Lichtadviesbureau.

Samenvatting. In het Instituut voor Perceptie Onderzoek te Eindhoven is in samenwerking met Philips' Natuurkundig Laboratorium een elektronisch meetsysteem voor menselijke reacties geconstrueerd. Het is genoemd naar de Nederlandse fysioloog Donders en is in staat, de grote hoeveelheid niet-intelligent werk die met het meten van reacties is verbonden, automatisch te verrichten.

Aan maximaal 20 proefpersonen kunnen tot 29 verschillende optische en akoestische stimuli worden gegeven. De reactietijden worden tot op 0,01 seconde nauwkeurig automatisch geregistreerd. De gehele programmering van een proef wordt tevoren vastgelegd in een ponsband, die de stimulator bestuurt. De meetresultaten verschijnen in code in een tweede ponsband, die geschikt is voor verdere verwerking, hetzij door een elektronische rekenmachine, hetzij door een speciaal daartoe ontworpen apparaat, de histometer. Bovendien kan een elektrische schrijfmachine de meetresultaten in direct leesbare vorm uittikken.

Tot slot wordt een experiment met tien stimuli en tien reacties beschreven, waaraan tien proefpersonen deelnamen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

IETS UIT DE GESCHIEDENIS VAN HET METEN VAN REACTIETIJDEN

door G. ten DOESSCHATE *). 159.938.343

Historicus is hij die belang stelt in het verleden. Het is niet onredelijk, een geschiedkundig artikeltje met deze definitie te beginnen.

Welnu, volgens deze definitie is iedereen die zijn omgeving met belangstelling gadeslaat, historicus. Gadeslaan betekent immers, zich openstellen voor prikkels om informatie te verkrijgen. Deze informatie zal altijd een toestand betreffen die tot het verleden behoort, zij het dan een zeer recent verleden, nog recenter dan dat waarover docenten der allernieuwste geschiedenis spreken: dit berust op het feit dat tussen het ogenblik waarop een prikkel op een zintuig begint in te werken, en het ogenblik waarop men het effect van de prikkel gewaarwordt, een zekere, zij het zeer korte, tijd ligt, de waarnemingstijd (latente periode der perceptie).

De verfijnde middelen waarmee men thans in de experimentele en toegepaste psychologie dergelijke waarnemingstijden weet te meten en in correlatie met andere verschijnselen te brengen — middelen waarvan men in dit tijdschriftnummer een indruk krijgt — konden ons weleens de barensweeën doen vergeten die het gekost heeft om op dit gebied tot enigszins scherpe begrippen en enigszins betrouwbare kwantitatieve gegevens te komen. Een Nederlander heeft een belangrijke bijdrage daartoe geleverd: we bedoelen het werk van Franciscus Cornelis Donders (*fig. 1*). In de korte schets die we hier willen geven, zullen we trachten de betekenis van Donders' werk op dit gebied duidelijk te maken. Om elk misverstand bij voorbaat uit te sluiten, zij erop gewezen dat deze schets op geen enkele manier recht kan doen wedervaren aan de grote figuur die Donders geweest is [1]).

Denkende over het denken, hebben de wijsgeren van de Oudheid ook nagedacht over het waarnemingsproces en dit in analogie met het denken willen zien. In een boek over de optica formuleert Clau-

*) Rustend geneesheer, Utrecht. Tot 1957 was dr. Ten Doesschate verbonden aan het Nationaal Luchtvaart-Geneeskundig Centrum te Soesterberg.

[1]) Van de betekenis van Donders, vooral als fysioloog en oftalmoloog, geven een indruk: E. C. van Leersum, Het levenswerk van F. C. Donders, Haarlem 1932; F. P. Fischer en G. ten Doesschate, Franciscus Cornelis Donders, Assen 1958.

Een bibliografie van Donders' wetenschappelijk werk, samengesteld door C. H. van Herwerden (mondelinge mededeling), omvat 339 publikaties — meervoudige publikaties in verschillende talen enkelvoudig geteld —, waarvan 77 op fysiologisch en 135 op oftalmologisch terrein.

Fig. 1. Franciscus Cornelis Donders (1818-1889), op 57-jarige leeftijd.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

dius Ptolemaeus (de man op wiens naam het voorkopernikaanse wereldbeeld staat; hij leefde omstreeks 150 na Chr. in Alexandrië) het ongeveer aldus. Zodra een voorwerp voor het oog verschijnt, maakt het een indruk op het zintuig, maar deze indruk is nog geen waarneming. Waarneming berust op een verwerking van de indruk door de psyche. Dit verwerkingsproces zou vergelijkbaar zijn met een zg. sluitrede of syllogisme uit de logica. Verschijnt b.v. voor het oog een bol, dan zou het door de indruk in gang gezette proces overeenkomen met de volgende redenering:

1) Ik krijg deze bepaalde indruk.
2) Wanneer ik vroeger een dergelijke indruk kreeg, werd deze veroorzaakt door een bol.
3) Ergo: wat ik nu zie, is een bol.

We willen in het midden laten, wat Ptolemaeus met deze formulering kan menen te hebben verklaard; het gaat ons in hoofdzaak om wat Ptolemaeus er nog aan toevoegt: hij zegt dat een dergelijke sluitrede met een zo grote snelheid wordt voltrokken dat men niet bemerkt dat men heeft geredeneerd. Voor hem — althans voor alle vragen die hij kon stellen — was een dergelijk proces oneindig snel.

Twijfel aan deze opvatting werd vele eeuwen lang niet uitgesproken, of beter gezegd: aan de vraag van de eigenlijke gewaarwording werd vooralsnog minder aandacht besteed, omdat men te veel in beslag genomen werd door andere vragen. De wetenschapsbeoefenaren worstelden tot in de 19de eeuw met de opheldering van het mechanisme van de zintuiglijke waarneming, vooral van het zien en het horen. Fysische en fysiologische, filosofische en anatomische onderzoekingen en theorieën volgden elkaar op, vulden elkaar aan of spraken elkaar tegen. Kepler, Mersenne, Descartes, Steno voor de gezichtszin, Coiter, Schelhammer, Mersenne, Willis, Perrault, Du Verney voor het gehoor, zijn enkele van de belangrijkste namen die men in die worsteling tegenkomt [2]). Weliswaar werd ook de verbinding tussen perceptie en actie aan de orde gesteld — wederom een belangrijk onderwerp, in dit tijdschriftnummer behandeld —, en hiermee kwam men weer dicht in de buurt van de vraagstelling van Ptolemaeus over de eigenlijke gewaarwording. Een beroemde afbeelding uit Descartes' „Traité de l'homme" illustreert dit op treffende wijze (*fig. 2*). Maar het essentiële element

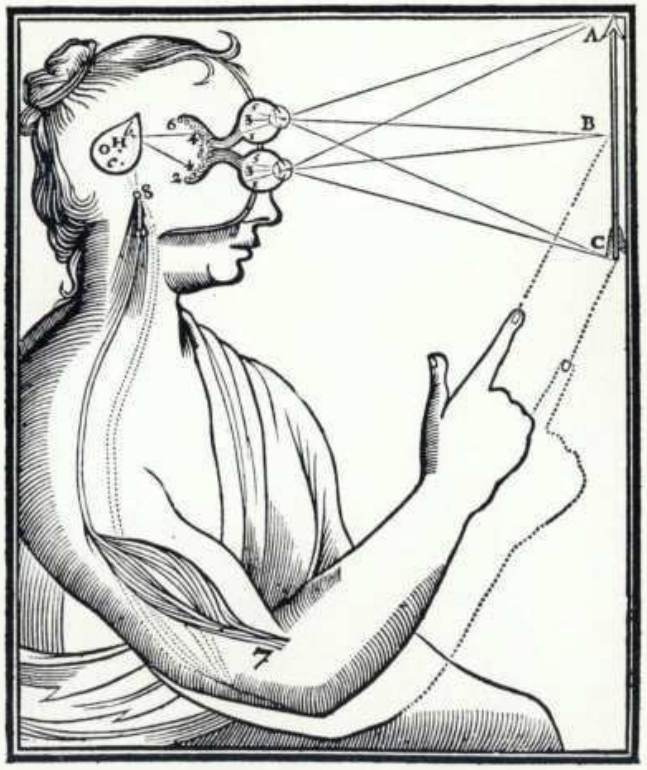


Fig. 2. Schematische voorstelling van het ontstaan van een zintuiglijke gewaarwording en een hierdoor veroorzaakte handeling, naar Descartes (Traité de l'homme, Parijs 1662). De eigenlijke verbinding tussen de twee processen zou volgens Descartes optreden in de pijnappelklier (epiphysis). In dit orgaan, als een niet-parig deel van de hersenen, dacht hij de ziel te kunnen lokaliseren.

in deze verbinding, de gewaarwording en de stap van hier tot het initiëren van de handeling, noemde Descartes zelf een „ondoorgrondelijk geheim, zetelende in de aard zelf van de ziel".

Voor de opvatting van Ptolemaeus over het waarnemingsproces, als een soort zich oneindig snel voltrekkend syllogisme, werd dus voorlopig niets anders in de plaats gesteld. Het idee van het syllogisme leefde overigens zelfs nog in de tweede helft van de vorige eeuw, toen Von Helmholtz wees op een gelijkenis tussen waarnemingsprocessen en „unbewusste Schlüsse", die „Analogieschlüsse" zouden zijn. Zo is het te begrijpen dat men niet aan de mogelijkheid dacht dat men ooit de duur van die bliksemsnelle processen zou kunnen meten. Nog omstreeks 1840 voorspelde de grote fysioloog Johannes Müller dat die oneindig kleine tijden nooit voor meting toegankelijk zouden worden. Men berustte in de voorstelling dat dergelijke processen toe te schrijven waren aan oneindig snelle bewegingen van een imponderabile (b.v. een „spiritus animalis") of aan een bijzonder „psychisch principe".

Toch hadden toen reeds enkele astronomen feiten geconstateerd die men later met het bestaan van een eindige waarnemingstijd in verband heeft gebracht.

[2]) Een fraai overzicht hiervan, met uitvoerige referenties aan de literatuur, is onlangs gegeven door A. C. Crombie: The „animate and sensitive body" in Renaissance science, voordracht op het 10de Internationale Congres voor de Geschiedenis der Wetenschappen, Ithaca (V.S.) 1962, nog niet in druk.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Het oudste geval dat in de literatuur is gevonden, is een mededeling van Rev. Maskelyne, aan wie de leiding in het Koninklijk Observatorium in Greenwich was toevertrouwd. Deze schreef [3]): „I think it necessary to mention that my assistant, Mr. David Kinnebrook, who had observed the transit of the stars and planets very well, in agreement with me, all the year 1794, and for great part of the present year, began, from the beginning of August last, to set them down half a second of time later than he should do, according to my observations; and in January of the succeeding year, 1796, he increased his error to 8/10-ths of a second. As he had unfortunately continued a considerable time in this error before I noticed it, and did not seem to me likely to get over it, and return to a right method of observing, therefore, though with reluctance, as he was a diligent and useful assistant to me in other respects, I parted with him."

Zo werd de arme Kinnebrook op straat gezet, en hij heeft niet kunnen vermoeden dat de resultaten van zijn observaties, die hem als fouten werden aangerekend en die hij zelf ook wel als zodanig zal hebben beschouwd, de aanleiding zouden worden dat zijn naam nog na meer dan anderhalve eeuw zou worden genoemd.

Ook andere astronomen konden de door Maskelyne beschreven onjuiste bepaling van tijden constateren. Zo schreef b.v. Bessel aan Gauss: „. . . . auch einige Versuche über eine sehr räthselhafte Verschiedenheit der absoluten Zeitangaben mehrerer Beobachter, welche schon Maskelyne 1794 bemerkte und welche ich bestätigt gefunden habe . . . .".

Arago schreef de observatiefouten toe aan de methode die men in Greenwich toepaste. De waarnemer ziet de ster langzaam door het gezichtsveld van de telescoop bewegen en op zeker moment door de kruisdraad van het oculair gaan. In Greenwich (en elders) moest de waarnemer dit moment interpoleren tussen de met het gehoor waargenomen (en getelde) tikken van een secondenslinger. Arago ging een andere techniek gebruiken; hij liet twee waarnemers samenwerken. De ene moest alleen de ster observeren en op het moment van doorgang een snelle armbeweging maken. De tweede moest op de secondetikken letten en de waargenomen plotselinge armbeweging van de eerste hiertussen interpoleren.

De resultaten waren helaas nog slechter dan die te Greenwich.

Astronomen hadden dus het verschijnsel van de reactietijd opgemerkt en waren ermee gaan experimenteren — uit bittere noodzaak, want dit effect en vooral de individuele spreiding ervan (l'équation personnelle) bracht de vereiste nauwkeurigheid van het bepalen van doorgangstijden in het gedrang. Fysiologen en psychologen daarentegen toonden tot ca. 1840 nog geen belangstelling ervoor. Met een modern woord zouden zij het waarschijnlijk als „Schmutzeffekt" hebben afgedaan. In de jaren 1840 tot 1850 kwam hierin verandering, door het opkomen van een generatie van grote fysiologen die vooral waarde hechtten aan het meten van grootheden. Du Bois-Reymond, leerling van Johannes Müller, trok de boven aangehaalde voorspelling van zijn leermeester in twijfel en schetste in 1845 in grote trekken een methode waarmee men de juistheid ervan zou kunnen toetsen. Von Helmholtz bracht deze methode in 1850 in praktijk. Hierbij maakte hij gebruik van een registrerend instrument, dat Ludwig — ook een der nieuwe, metende, fysiologen — enkele jaren tevoren had beschreven, het kymografion. Dit toestel, dat Ludwig had geconstrueerd voor een onderzoek over bloeddrukvariaties [4]), maar waarvan het principe talrijke toepassingen in de fysiologie zou vinden — zo ook bij de proeven van Donders waarover wij straks komen te spreken —, bestond uit een verticale, gelijkmatig draaiende, beroete trommel, waartegen een schrijfstift werd gedrukt die in verticale richting werd verplaatst in overeenstemming met de te meten grootheid (*fig. 3*). Von Helmholtz nu prikkelde een spierzenuw van een kikvors, op een punt op enige afstand van het intreepunt van de zenuw in de spier gelegen. Door registratie werden het moment van prikkeling en het moment van spiercontractie vastgelegd. Er bleek een eindige tijd tussen deze momenten te verstrijken! Onmiddellijk deed Von Helmholtz de volgende stap en voerde het experiment uit met successieve prikkeling op twee verschillende punten: dit leidde tot twee verschillende vertragingstijden, en hieruit kon de voortplantingssnelheid van de prikkel in de zenuw worden afgeleid. Deze bleek slechts 100 voet per seconde te bedragen. Geen bliksemsnelheid dus, maar, zoals Donders later opmerkte, „een snelheid die vogels in hun vlucht

[3]) Astronomical Observations made at the Royal Observatory at Greenwich, 1799.

[4]) K. Ludwig, Beiträge zur Kenntniss des Einflusses der Respirationsbewegungen auf den Blutlauf im Aortensysteme, Müller's Arch. Anat. 1847, 240-302. — Voor de algemene betekenis van Ludwigs toestel als etappe in de ontwikkeling van de registreertechniek, aansluitend op een registrerende hodometer van Ruckert (ca. 1575), een registrerende barometer van Wren (ca. 1663), en de bekende indicateur van Watt, zie: Hebbel E. Hoff en L. A. Geddes, The beginnings of graphic recording, Isis **53**, 287-324, 1962 (deel 3).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

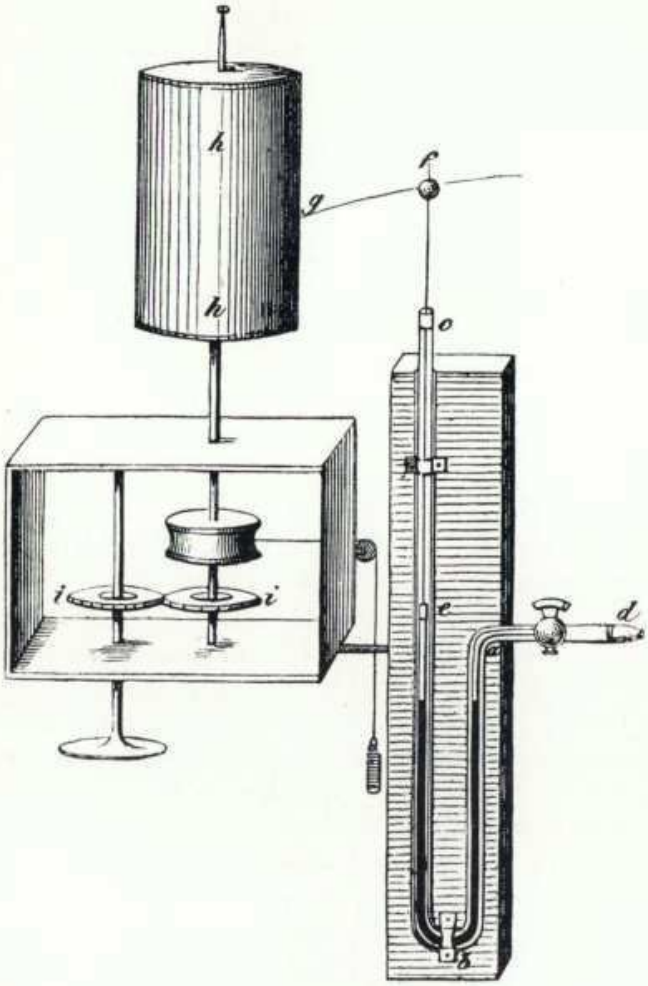


Fig. 3. Het kymografion van Ludwig, geconstrueerd in 1847 voor het registreren van bloeddrukvariaties. Uit: K. Ludwig, Lehrbuch der Physiologie des Menschen, Winter, Heidelberg 1852-1856.

overtreffen, die renpaarden nabijkomen en die onze hand bij de snelste bewegingen van de arm bereiken kan". Soortgelijke onderzoekingen bij warmbloedige dieren en bij mensen gaven analoge, hoewel kwantitatief verschillende resultaten. Bij de mens vond men waarden die variëren tussen 6 m/s en 120 m/s, naar gelang van de aard en vooral van de diameter van de zenuwvezels. Von Helmholtz zelf maakte erop attent dat het maar goed is dat de mens nogal kleine afmetingen heeft: de relatief trage geleiding in de zenuwen kan hem daardoor niet veel kwaad berokkenen (bij het snelverkeer van thans denken we daar anders over), maar een walvis zou er wel degelijk last van moeten hebben: deze zou een verwonding aan zijn staart pas ca. 1 seconde later voelen, en de verdedigingsactie van de staart zou ca. 2 seconden post festum komen.

Het is misschien goed, zich nog even te realiseren welke essentiële rol het kymografion bij deze onderzoekingen vervulde. Het was weinig hoopvol, de momenten van prikkeling en van reactie van een proefpersoon te laten vastleggen door rechtstreekse waarnemingen van een waarnemer: het zou dan moeilijk uit te maken geweest zijn of en in hoever eventuele vertragingstijden voor rekening van de proefpersoon dan wel van de waarnemer kwamen. Het is dan ook wel geen toeval dat de astronomen het eerst op die verschijnselen begonnen te letten: de vertragingstijden van de „proefpersoon" werden hier als het ware geregistreerd tegen de gelijkmatige wenteling van de aarde. Het kymografion zette hiervoor in de plaats de gelijkmatige wenteling van de beroete trommel.

Over de vraag, of het indicatiemechanisme geen eigen vertragingen introduceerde, hetgeen heden bij registrerende instrumenten vaak zo'n belangrijk gezichtspunt is, behoefde men zich toen nog geen zorgen te maken.

Na de bevindingen van Von Helmholtz over de voortplantingssnelheid van prikkels in zenuwen heeft men spoedig zijn aandacht gericht op de meer samengestelde maar voor de praktijk zoveel belangrijker grootheid van de reactietijd en deze aan talrijke onderzoekingen onderworpen. Deze tijd, door Hirsch ingevoerd als de „fysiologische tijd", is het tijdsinterval gelegen tussen het ogenblik van prikkeling van een proefpersoon en het ogenblik waarop deze door een signaal aanduidt dat hij de prikkel heeft waargenomen [5]). Als we naar het fundamentele plaatje van Descartes kijken (fig. 2), beantwoordt die tijd aan het doorlopen van de volledige weg vanaf het zichtbaar worden van het object tot het voltooien van de beweging van de hand (het wijzen van de vinger naar een bepaald punt laten we buiten beschouwing — het veel ingewikkelder stuurproces dat er dan nog bij te pas komt, is behandeld in een der artikelen in dit nummer [6])).

Van de door verschillende experimentatoren gevonden reactietijden bij prikkeling van verschillende zintuigen geeft *tabel I* een indruk. Men ziet dat de gezichtszin de langzaamste reactie heeft, althans indien vrij sterke prikkels gegeven worden. Zijn de prikkels zo zwak dat ze nog maar net waargenomen worden, dan zijn de reactietijden voor alle zintuigen langer, maar ze verschillen nu vrijwel niet meer.

We komen nu tot de proeven van Donders. Toen het bekend was geworden dat de voortgeleiding in zenuwen en het menselijk reactievermogen

[5]) A. Hirsch, Expériences chronoscopiques sur la vitesse des différentes sensations et de la transmission nerveuse, Bull. Soc. Sciences Naturelles Neuchâtel **6** (1861-1864), blz. 100-114. De samengesteldheid van het interval wordt hier duidelijk aangegeven: „... ce que l'on peut appeler le temps physiologique pour les différents sens de l'ouïe, de la vue et du toucher; temps qui comprend trois éléments, qu'il est extrêmement difficile, sinon impossible de séparer, à savoir: 1° la transmission de la sensation au cerveau; 2° l'action du cerveau qui consiste à transformer pour ainsi dire la sensation en acte de volonté; 3° la transmission de la volonté dans les nerfs moteurs et l'exécution du mouvement par les muscles".

[6]) J. M. Westhoff, Op zoek naar een maat voor de perceptieve arbeid, Philips techn. T. **24**, 362-371, 1962 (no. 11/12).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Tabel I. Reactietijd in seconden, bij prikkeling van verschillende zintuigen, gemeten door verschillende onderzoekers (bij de minimale prikkeling zijn gemiddelde uitkomsten van een aantal onderzoekers opgegeven).

	Sterke prikkels			Minimale prikkels (gemiddelde)
	Donders	Wundt	Von Kries	
Gehoor	0,180	0,167	0,120	0,337 ± 0,050
Gezicht	0,200	0,222	0,193	0,331 ± 0,057
Tastzin	0,182	0,201	0,171	0,327 ± 0,032

niet het kenmerk van „bliksemsnelheid" vertonen, heeft Donders zich afgevraagd [7]):

„Zou nu ook de gedachte *niet* de oneindige snelheid hebben, die men daaraan pleegt te verbinden, en zou het mogelijk zijn de tijd te bepalen, die tot het vormen van een voorstelling of wilsbepaling leidt?"

Het zijn vragen die direct doelen op de geheimzinnige verbinding tussen de punten *b* en *c* in Descartes' schematische voorstelling, de verbinding waarin zelfs Descartes bij zijn mechanisering van het wereldbeeld het mysterieuze, onkenbare wilde blijven erkennen. Donders vermeldt die vragen natuurlijk alleen omdat hij een kans zag ze te beantwoorden. Hij wilde daartoe onmiddellijk aanknopen bij de proeven over de reactietijd. Als een bepaald, niet nader bekend, deel van de reactietijd toch al behoort tot een „eigenlijk psychisch proces", dan zou men kunnen trachten, redeneerde Donders, „om in het proces van den physiologischen tijd nieuwe termen van psychische werking in te schuiven. Onderzocht ik, hoeveel de physiologische tijd hierdoor verlengd werd, dan zou, zoo oordeelde ik, de duur van de ingeschoven term daarmede bekend zijn."

De „nieuwe term van psychische werking" die Donders wilde inschuiven, betrof het nemen van een beslissing omtrent de te geven signalen. Stel dat een proefpersoon een elektrische prikkel in zijn rechtervoet ontvangt en dit moet signaleren door op een knop te drukken die zich onder zijn rechterhand bevindt. Dit was een reactietijdmeting van het reeds bekende soort, Donders noemde dit een *a*-reactie. Precies hetzelfde kon men doen door prikkeling van de linkervoet en signaleren met een knop onder de linkerhand. Stel nu echter dat de proefpersoon beide knoppen ter beschikking heeft en dat soms zijn linker-, soms zijn rechtervoet geprikkeld wordt, wat de persoon dan met de overeenkomstige knop moet signaleren. De reactietijd bij een reeks proeven van dit soort (door Donders een *b*-reactie genoemd) bleek gemiddeld $^1/_{15}$ s langer te zijn dan die voor de *a*-reactie. De ingeschoven term van psychische werking, het beslissen welke knop neergedrukt moest worden, kostte dus $^1/_{15}$ s.

Wat wij hier het „beslissen" genoemd hebben, was in werkelijkheid al een samengestelde extrafunctie; dit besefte ook Donders. De functie houdt nl. in, dat eerst tussen de ontvangen prikkels onderscheiden wordt (is het de rechter- dan wel de linkervoet die geprikkeld is?), en dat vervolgens een keuze wordt gemaakt tussen de twee signaleringsmogelijkheden, nl. met de rechter- dan wel met de linkerhand. Bij een volgende reeks experimenten wilde Donders deze beide functies scheiden. Hij gebruikte nu andere stimuli en signalen: de proefleider moest één van de vijf lettergrepen „ka, ke, ki, ko, ku" uitspreken; de proefpersoon moest bij een serie proeven op elke lettergreep reageren door diezelfde lettergreep uit te spreken (*b*-reactie). Bij een volgende serie proeven daarentegen moest de proefpersoon alleen reageren als er een „ki" uitgesproken was, en dan altijd zelf een „ki" uitspreken. Dit laatste noemde Donders een *c*-reactie. Naar zijn redenering moest de proefpersoon hier wel de functie van het onderscheiden uitoefenen, maar behoefde niet te kiezen. Werd ook de *a*-reactie erbij betrokken, die nu daarin bestond dat de proefleider alleen „ki" kan zeggen, waarop de proefpersoon telkens met „ki" moet reageren, dan moest volgens Donders zowel de tijd nodig voor het onderscheiden als de tijd nodig voor het kiezen eenvoudig als verschil van telkens twee gemeten reactietijden kunnen worden gevonden: de eerste als verschil tussen de reactietijd van *c* en die van *a*; de tweede als verschil tussen de reactietijd van *b* en die van *c*.

Fig. 4 toont het toestel, de noëmatachograaf (gedachtesnelheidsschrijver), waarmee Donders deze proeven uitvoerde [8]). Dit toestel wordt nu nog in het Fysiologisch Laboratorium van de Universiteit te Utrecht bewaard. Het bevat weer de draaiende beroete trommel van Ludwigs kymografion (hier horizontaal opgesteld), en voorts een membraan (een „elastiek vlies") met schrijfstift. De membraan werd door het geluid zowel van de proefleider als van de proefpersoon in trilling gebracht, de tril-

[7]) F. C. Donders, Über die Schnelligkeit psychischer Prozesse, Pfl. Arch. Anatomie u. Physiologie 1868, 657-681. — Een leerling van Donders, nl. J. J. de Jaager, was reeds in 1865 op ditzelfde onderwerp gepromoveerd, met een dissertatie over „De fysiologische tijd bij psychische processen", waarvan Donders later zich genoopt zag op te merken dat het werk naar *zijn* ideeën en onder *zijn* leiding was uitgevoerd.

[8]) F. C. Donders, Twee werktuigen tot bepaling van den tijd, voor psychische processen benoodigd, Ned. Arch. Genees- en Natuurkunde **3**, 105-109, 1868.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

lingen — waarvan in dit geval niet het verloop maar uitsluitend het beginpunt van belang is — werden op de trommel geregistreerd. De trommel werd door een hulpje met de hand gedraaid: een trillende stemvork met schrijfstift gaf de nodige tijdmarkeringen op de trommel.

Als gemiddelde waarden van de reactietijden voor reacties *a*, *b* en *c* vond Donders respectievelijk 197, 285 en 243 milliseconden. Voor de onderscheiding bleek dus een tijd van 46 ms, voor de feitelijke keuze een tijd van 42 ms nodig te zijn.

Wat was de betekenis van dit nieuwe soort gegevens over psychische functies? Donders kon, om weer zijn eigen woorden te gebruiken, nu zomin als ooit zeggen, wat de gedachte is, maar hij had althans gemeten, hoe lang zij duurt. Dat dit mogelijk was, gaf naar zijn mening pas een rechtvaardiging om verder te gaan dan het reeds lang onderstelde algemene verband tussen psychische processen en hersenfunctie, en om vragen te gaan stellen omtrent individuele processen. De geringe nauwkeurigheid van de bepaalde tijden deed daar weinig van af, evenmin als het feit dat men kan betwijfelen of bij de *c*-reactie het element van keuze werkelijk uitgeschakeld is, en of de tijden voor de psychische deelprocessen werkelijk eenvoudig additief zijn — twijfels die lange tijd de verdere werkrichting van Donders' vakgenoten hebben bepaald. Men *is* verdergegaan met vragen omtrent de individuele psychische processen — ettelijke bladzijden in dit nummer leggen hiervan getuigenis af.

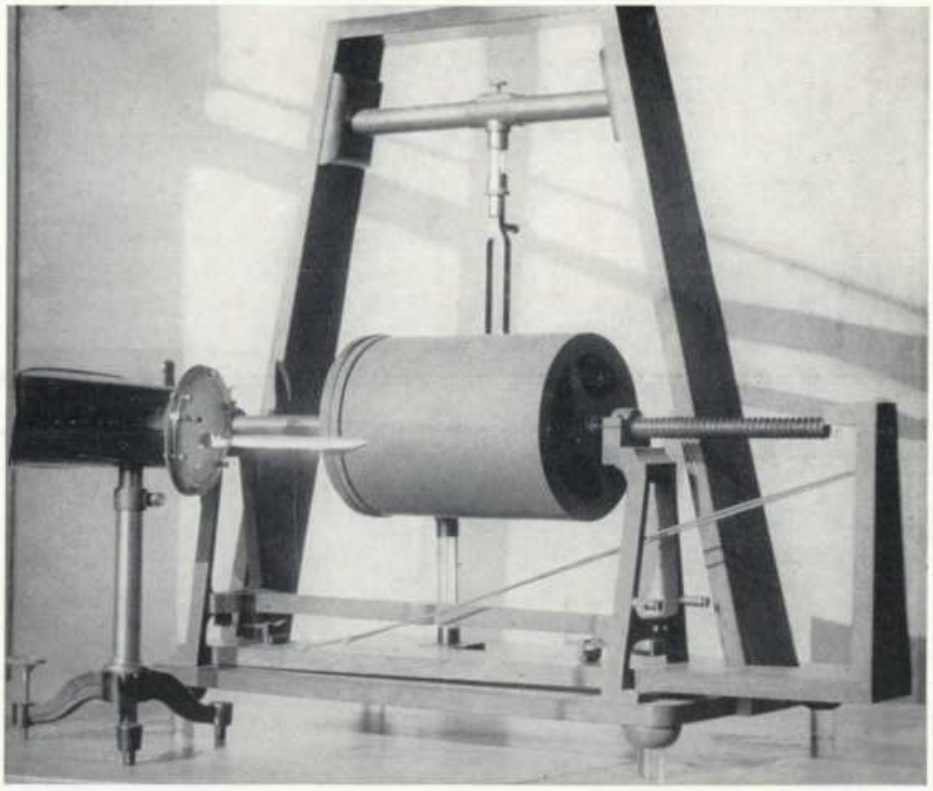


Fig. 4. De noëmatachograaf van Donders, die thans nog in het Fysiologisch Laboratorium te Utrecht wordt bewaard. (De foto wordt hier gereproduceerd met toestemming van prof. dr. Jongbloed, directeur van dat laboratorium.) Voor een beschrijving reproduceren we hier een stuk uit Donders' eigen publikatie hieromtrent [8]).

De *noëmatachograaf* bestaat uit een cilinder, veelszins overeenkomende met dien van den phonautograaf, op welken door eene trillende stemvork de tijd wordt geregistreerd. Naast diens trillingen wordt 1°. het oogenblik aangegeven, waar op een prikkel inwerkt, en 2°. het oogenblik, waarop het teeken van gewaarwording, het signaal gegeven wordt.

Verschillende prikkels kunnen worden aangewend, als een openings-inductieslag, het openen of sluiten van een constanten stroom, een vonk of een grooter lichtverschijnsel, transparente letterteekens, waarachter een sterke inductievonk, eindelijk een geluid, hetzij van een veer, die door eene naast den cilinder uitstekende stift wordt aangeslagen, hetzij van een stemvork, op bijzondere wijze plotseling in trilling gebragt, en deze trillingen onmiddellijk registreerende, hetzij eindelijk van de menschelijke stem, of eenig ander geluid, geregistreerd door een phonautograaf of liever door een vereenvoudigd toestel, bestaande uit een gewijzigd stethoscoop van König, met elastiek vlies bespannen en door twee caoutchoucbuizen met twee mondstukken verbonden.

Op den prikkel kan nu met verschillende signalen gereageerd worden:

het sluiten van een stroom door drukking op een zoogenaamden sleutel, waarbij een electro-magneet eene stift in beweging brengt (minder doelmatig wegens het wankelbare retard); *b*. het aanslaan van eene stemvork of het procudeeren van een stemklank, bij sommige proeven, waaruit vele prikkels één te onderscheiden is noodzakelijk vereischt, *c*. het zijdelings wegslaan van een horizontaal

Samenvatting. Tot in de 19de eeuw had het wetenschappelijk onderzoek omtrent de perceptie in hoofdzaak betrekking op het mechanisme van de zintuiglijke waarneming. De verbinding tussen perceptie en actie werd niet aan de orde gesteld of als een ondoorgrondelijk geheim beschouwd (Descartes). Men meende dat waarnemingsprocessen zich oneindig snel voltrekken. Tegen het begin van de 19de eeuw was echter door de astronomen het bestaan van een eindige reactietijd als een reëel (en hinderlijk) verschijnsel onderkend. Von Helmholtz mat in 1850 de eindige voortplantingssnelheid van prikkels in zenuwvezels, Hirsch voerde het begrip van de reactietijd in. Donders heeft toen, omtrent 1865, de mogelijkheid geopperd en gedemonstreerd om met behulp van metingen van reactietijden ook de tijdsduur van afzonderlijke mentale processen zoals discriminatie en keuze, die in het verband tussen perceptie en actie een rol spelen, bij benadering te bepalen. Het artikel geeft een beschrijving van het toestel (de noëmatachograaf) dat Donders voor deze metingen gebruikte.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!